

Série n° 6 – 27 mars 2025

Matériaux, énergie, recyclage et ordres de grandeur

Exercice 1

Répondez par vrai ou faux aux questions suivantes :

- | | Vrai | Faux |
|--|-------------------------------------|-------------------------------------|
| a. <i>Les métaux sont de bons conducteurs de l'électricité, mais ils sont très fragiles et cassent avant de se déformer.</i> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Les métaux sont effectivement de bons conducteurs de l'électricité (ils ont des électrons libres), mais au contraire des céramiques, ils sont en général maléables/ductiles et peuvent donc se déformer. | | |
| b. <i>Les céramiques sont des matériaux inorganiques qui sont dans l'ensemble de mauvais conducteurs de l'électricité.</i> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| C'est vrai : Les liaisons sont essentiellement de type ionique, voire covalente, et les électrons ne peuvent pas circuler librement. | | |
| c. <i>Il est plus coûteux en énergie de recycler l'aluminium plutôt que de l'extraire de son oxyde.</i> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| C'est faux : Séparer les atomes d'aluminium de l'oxygène est un processus beaucoup plus énergivore que réchauffer et refondre de l'aluminium métallique. | | |
| d. <i>La silice (SiO₂) est le matériau de base des fibres optiques car elle absorbe très peu la lumière dans une certaine gamme de fréquence, et peut être mise en forme de fibre de façon industrielle.</i> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| C'est vrai : La silice des fibres optiques est sous forme vitreuse et le verre lors de l'étirage reste sous cette forme. Il absorbe très peu les ondes électromagnétiques et on s'arrange même pour avoir un gradient d'indice de réfraction (comme dans un mirage) pour que l'onde reste canalisée dans la fibre. | | |
| e. <i>La classe des matériaux organiques comprend aussi bien des matériaux synthétiques que naturels.</i> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| C'est vrai : Le lin, la laine, le téflon, le caoutchouc sont tous des matériaux organiques. | | |
| f. <i>Le kWh est une unité de puissance.</i> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| C'est faux : Le kW est une unité de puissance, le kWh (puissance développée pendant une heure) est une unité d'énergie qui vaut $1000 \text{ W} \times 3600 \text{ s} = 3.6 \text{ MJ}$. | | |
| g. <i>L'or étant un métal très dense (environ 20'000 kg/m³), un lingot d'or de 1 kg occupe un volume de 0.5 litre.</i> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| C'est faux : $1/20'000 \text{ m}^3$ vaut $5 \times 10^{-5} \text{ m}^3 = 0.05 \text{ l}$. Un kilo d'or occupe donc un volume d'un demi-décilitre. | | |

- h. La peau est un matériau organique alors que l'émail des dents est une céramique, qu'un implant dentaire est un alliage métallique et que le matériau pour combler le vide dû à une carie est un composite polymère-céramique.

☒ ☐

C'est vrai : Même si l'émail des dents contient un peu d'eau et de protéines, il est composé à environ 95% de phosphate de calcium et de carbonate de calcium, tous deux des céramiques (minéraux). L'implant dentaire est un alliage base-titane et le composite utilisé pour l'obturation de cavités dentaires est un polymère (polymérisés d'ailleurs par des UV) chargé de particules de quartz et autres céramiques.

- i. Le diamant et le graphite sont tous deux composés de carbone.

☒ ☐

C'est vrai : Nous verrons que le diamant a une structure cubique alors que celle du graphite est hexagonale, ceci à cause des liaisons entre atomes de carbone (hybridation).

- j. Contrairement au graphite, le diamant ne brûle pas, même porté à haute température ($> 1400^\circ\text{C}$).

☐ ☒

C'est faux : Le diamant est une forme solide du carbone obtenue à très haute température et très haute pression (conditions rencontrées lors du refroidissement de la Terre). Si l'on chauffe sous vide du diamant, il ne se retransforme pas en graphite (quand bien même cette dernière est plus stable d'un point de vue énergétique). Mais chauffé dans l'air à haute température, le diamant brûle en produisant du CO_2 .

Exercice 2 : La force électromotrice d'une pile

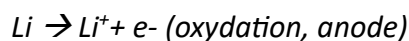
Une pile est formée par des couples redox (Ni^{2+}/Ni) et (Li^+/Li).

- a. Dessiner un schéma de la disposition pour cette pile indiquant l'anode et la cathode, où se produit quelle demi-réaction et dans quelle direction se déplacent les électrons.

$$E^0 (\text{Ni}^{2+}/\text{Ni}) = -0.23 \text{ V}$$

$$E^0 (\text{Li}^+/\text{Li}) = -3.04 \text{ V}$$

Li est le réducteur le plus fort. Les demi-réactions seront :



Les électrons se déplacent de l'anode à la cathode. Voir cours pour un exemple de dessin.

- b. Quelle est la f.é.m. de cette pile si les concentrations de Li^+ et Ni^{2+} sont égales respectivement à 0.1 M et 10^{-9} M, à 25°C ?

Li est le réducteur, donc la réaction est $2 \text{Li} + \text{Ni}^{2+} \rightarrow 2 \text{Li}^+ + \text{Ni}$

$$\Delta E_{\text{pile}} = \Delta E^0 - \frac{RT}{zF} \ln Q = \Delta E^0 - 0.0128 \text{ V} \ln Q$$

$$\Delta E^0 = E^0_{\text{cathode}} - E^0_{\text{anode}} = E^0 (\text{Ni}^{2+}/\text{Ni}) - E^0 (\text{Li}^+/\text{Li}) = -0.23 - (-3.04) \text{ V} = 2.81 \text{ V}$$

$$\text{Quotient réactionnel: } Q = \frac{[\text{Li}^+]^2}{[\text{Ni}^{2+}]} = \frac{(10^{-1})^2}{10^{-9}} = 10^7$$

$$\Delta E_{\text{pile}} = 2.81 \text{ V} - 0.0128 \text{ V} \ln(10^7) = 2.604 \text{ V}$$

Exercice 3 : Consommation énergétique et énergie solaire

En 2014, la consommation d'énergie par habitant de la Terre était de 1906 kg équivalent pétrole (EP), toutes formes d'énergie confondues. Aux Etats-Unis, la moyenne est de 6'960 kg EP alors qu'en Inde, elle n'était que de 631 kg EP. Sachant que l'équivalent électrique de 1 kg EP est 11.6 kWh :

a. Quel est l'équivalent énergétique de 1 kg EP en Joules.

1 kg EP vaut donc 11.6 kWh, soit : $11.6 \times 10^3 \text{ W} \times 3600 \text{ s} = 41.8 \times 10^6 \text{ J} = 41.8 \text{ MJ}$

b. Quelle est la puissance en Watt consommée en permanence tout au long de l'année 2014 par un Américain moyen ? Et par un Indien moyen ?

Un Américain consommant une énergie équivalente à 6'960 kg EP par an, il suffit de convertir cette quantité à l'aide de la réponse (a), des Joules, et de diviser ce résultat par le nombre de secondes dans une année pour trouver la puissance utilisée tout au long de l'année. Donc :

$$\frac{6960 \times 41.8 \times 10^6 \text{ J}}{365 \times 24 \times 3600 \text{ s}} = 9216 \text{ W} \approx 9 \text{ kW}$$

Pour un Indien, c'est environ 10 fois moins :

$$\frac{631 \times 41.8 \times 10^6 \text{ J}}{365 \times 24 \times 3600 \text{ s}} = 836 \text{ W}$$

c. Afin de diminuer l'impact humain sur l'environnement, pourquoi les pays occidentaux parlent-ils de vouloir atteindre une société à 2000 Watt ?

On parle d'atteindre une société à 2000 W afin de correspondre à un peu moins de la moyenne dépensée par un Terrien :

$$\frac{1906 \times 41.8 \times 10^6 \text{ J}}{365 \times 24 \times 3600 \text{ s}} = 2524 \text{ W}$$

d. Une société à 2000 Watt dans tous les pays développés aurait-elle un effet sur l'environnement si, dans le même temps, les pays en voie de développement rejoignent notre niveau de vie ?

Si l'on arrondit les chiffres, un Américain consomme environ 9 kW, un Européen environ 6 kW alors que la moyenne d'un Terrien est de 2.5 kW. Il y a beaucoup de personnes dans les pays en voie de développement qui sont très en-dessous de la valeur moyenne (Inde, Afrique, Amérique du Sud, ...) pour permettre à un nombre restreint (Europe, USA,...) d'être très largement au-dessus de cette moyenne. Si ces derniers baissaient drastiquement leur

consommation pour permettre aux plus nombreux de l'augmenter, tout en gardant la même valeur moyenne, cela n'aurait pas d'impact direct sur l'environnement. Mais si les pays développés descendaient leur consommation à 2 kW et que les pays en voie de développement visaient cette valeur, la moyenne serait alors de 2000 W, soit 20% de moins qu'en 2014, d'où un impact.

- e. *Sachant que le désert du Sahara a une superficie de 8.5 millions de km² et que le rayonnement solaire moyen à cette latitude est environ 600 W/m² (en tenant compte des nuits), couvrir le Sahara de panneaux solaires, dont le rendement pratique est environ 10%, suffirait-il pour satisfaire les besoins énergétiques de l'humanité (environ 8 milliards d'êtres humains), toutes formes d'énergie confondues ?*

L'énergie consommée par l'humanité représente une consommation permanente (puissance) de :

$$2524 \text{ W} \times (8 \times 10^9) = 20.2 \times 10^{12} \text{ W} = 20.2 \text{ TW}$$

Le nombre N de panneaux solaires de 1 m² qu'il faudrait installer dans le Sahara pour fournir toute la planète en énergie serait donc donné par :

$$N \times 600 \times 0.1 = 20.2 \times 10^{12} \text{ W}$$

D'où : $N = 337 \times 10^9$ panneaux de 1 m², couvrant donc une surface de 337'000 km². Cela ne représente que 4% de la surface du Sahara ! Ce serait donc possible... mais subsisteraient quand même un certain nombre de problèmes : fabrication de 337 milliards de panneaux (42 panneaux par personne), installation, maintenance, nettoyage (pour enlever le sable), distribution de l'énergie... et surtout stockage ! Ce dernier problème est rencontré dans toute installation modeste de panneaux solaires : les panneaux produisent de l'électricité le jour, surtout en été, alors que la consommation est plutôt le soir et surtout en hiver !

Exercice 4 : Quelques faits sur les déchets plastiques

Les déchets plastiques constituent un problème croissant pour l'environnement. Ils sont constitués en majeure partie de polymères synthétiques fabriqués par des procédés de pétrochimie (à opposer aux polymères naturels tels la lignine (le bois)). Ils sont très résistants à la dégradation, ce qui est utile pour certaines applications, mais qui pose un problème conséquent pour les déchets sur terre ou en mer.

L'hydrolyse du poly(éthylène téréphtalate) (PET), c'est à dire sa décomposition par des molécules d'eau (H₂O), s'effectue selon la loi suivante reliant le temps de dégradation t_d d'une couche mince de 250 μm immergée dans de l'eau à température T :

$$t_d = A \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right)$$

A et E_a étant des constantes indépendantes du temps et de la température, k est la constante de Boltzmann ($k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$), et T la température (en Kelvin, K).

- a. *Quelles sont les dimensions des constantes A et E_a ?*

kT a donc la dimension d'une énergie et donc E_a aussi la dimension d'une énergie (J). Quant à l'unité de A , c'est bien évidemment celle de t_d , donc d'un temps (s ou jour). Nous verrons, notamment pour la diffusion d'espèces chimiques dans les matériaux, que ce processus est dit « *thermiquement activé* » : plus la température est élevée et plus la réaction est importante, et donc le temps de réaction court.

- b. Des chercheurs ont mesuré un temps de dégradation de 54 jours à 85°C, et de 20 jours à 95°C. Calculer les constantes A et E_a .

Nous avons 2 inconnues à déterminer, A et E_a , et nous avons pour cela 2 équations, les temps de transformation à deux températures différentes. Soit :

$$54 = A[j] \exp\left(\frac{E_a [J]}{k \times (85 + 273)}\right)$$

$$20 = A[j] \exp\left(\frac{E_a [J]}{k \times (95 + 273)}\right)$$

En faisant le rapport de ces 2 équations pour éliminer $A [J]$ et en prenant le logarithme naturel, on a alors :

$$\ln \frac{54}{20} = \frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{85 + 273} - \frac{1}{95 + 273} \right)$$

D'où l'on déduit :

$$E_a = 180.6 \times 10^{-21} \text{ Joule}$$

Le coefficient pré-exponentiel A est alors trouvé en insérant E_a dans l'une ou l'autre équation. On obtient :

$$A = 7.214 \times 10^{-15} \text{ jour}$$

- c. En déduire un temps de dégradation par hydrolyse minimum pour une bouteille de PET, dont les parois font 250 μm , jetée dans l'océan (température moyenne de 25°C en surface).

A une température de 25 C, le temps de dégradation serait :

$$t_d = 7.214 \times 10^{-15} \exp\left(\frac{180.6 \times 10^{-21}}{1.38 \times 10^{-23} \times (25 + 273)}\right) = 85'238 \text{ jours}$$

Ce qui représente environ 233 ans ! En fait, les parois d'une bouteille de PET sont plus épaisses, en tout cas dans certaines parties (le fond par exemple), et le temps de dégradation serait donc conséquemment plus lent encore.

- d. Certains déchets dont le PET se dégradent en fait de façon bien plus rapide, de l'ordre de l'année. A votre avis, quels sont les mécanismes ou source d'énergie qui pourraient contribuer à accélérer cette dégradation ?

La dégradation des polymères, c'est à dire les réactions chimiques qui vont casser les longues chaines C-C ou C-A (atome) et petit-à-petit décomposer le matériau, peut avoir de nombreuses origines : l'hydrolyse, mais aussi l'attaque par des micro-organismes (biodégradation par des algues, des bactéries ou des microbes), ou par photo-dégradation (effet de la lumière et notamment les UV qui peuvent casser des liaisons chimiques). Cette dernière domine pour beaucoup de plastiques comme les déchets de PET à la surface des océans fortement exposés au soleil. Bien qu'accélération la dégradation, les molécules résultantes de ces réactions sont des sources de pollution importantes pour les algues et les poissons ingérant ces petits bouts de plastiques. Ce problème environnemental, de plus en plus étudié, prend des proportions inquiétantes quand on sait qu'un « continent de plastique », aussi grand que 6 fois la surface de la France, s'est formé par accumulation de ces plastiques entraînés par des courants.