Compétences exigibles

- Réaction de fission et de fusion : savoir distinguer les deux.
- Il est nécessaire de stocker et de transporter l'énergie.
- L'électricité est un des modes de transport de l'énergie.
- Les déchets nucléaires posent quelques petits problèmes (pas LoL !).
- Savoir interpréter une courbe de décroissance radioactive.
- Savoir faire preuve d'esprit critique quant aux avantages et inconvénients des ressources énergétiques.
- Savoir que les activités humaines posent quelques petits problèmes écologiques patents.

Chapitre 13 – Énergie : transport, stockage

1 Quelles sont les réactions nucléaires au sein d'une centrale ?

Principe général L'uranium 235 est le seul atome à l'état naturel dont le noyau se brise en deux noyaux plus petits sous l'effet d'un choc avec un neutron (passant dans le coin, comme ça par hasard). Cette transformation est une réaction nucléaire que l'on appelle réaction de *fission* et on dit que l'uranium 235 est *fissible*.

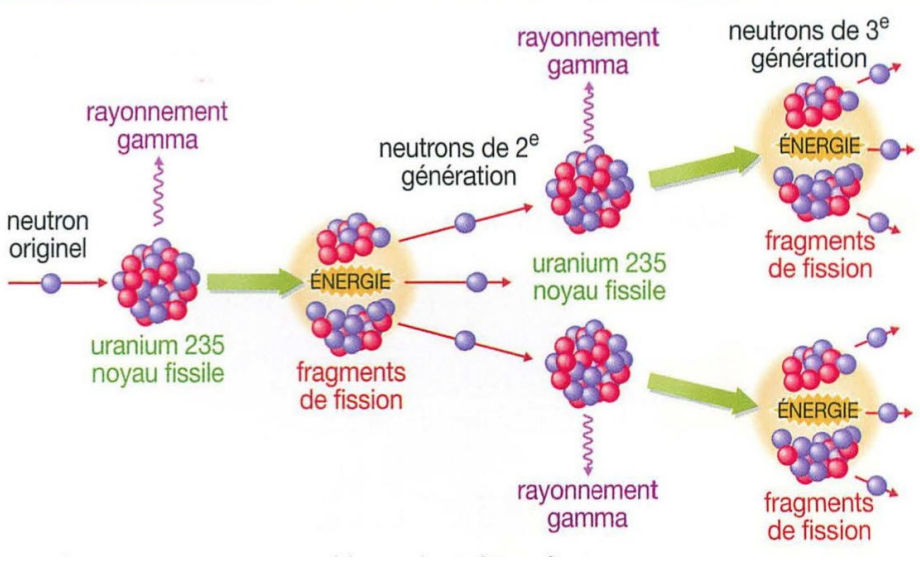


FIG. 1 – Réaction en chaîne pour l'uranium 235

Possibilité d'une réaction en chaîne Les deux fragments de fission sont appelés noyaux fils. La réaction libère aussi entre deux ou trois neutrons (2,47 neutrons en moyenne), qui peuvent (après avoir été préalablement ralentis) provoquer deux ou trois nouvelles réactions : c'est la réaction *en chaîne*

Dans un réacteur nucléaire, la réaction en chaîne est maîtrisée pour maintenir un rythme de fissions constant.

Énormément d'énergie Pour un gramme d'uranium, la quantité d'énergie libérée est considérable : la fission d'un noyau d'uranium 235 libère la même énergie que la combustion de 33 millions d'atomes de carbone.

Les produits de fission emportent cette énergie sous forme d'énergie cinétique, énergie qu'ils perdent au cours des chocs avec la matière environnante, donc en transfert *thermique* (chaleur).

Le problème de rayons gamma À chaque modification d'un noyau, un rayonnement γ (lettre grecque « gamma ») est émis. Il s'agit d'un rayonnement pénétrant et très ionisant, c'est-à-dire qu'il va rompre des liaisons et faire apparaître des ions au sein de la matière qu'il traverse, y inclus la matière organique et notamment l'ADN codant l'information génétique !

Les nucléides sont des noyaux comme les autres En chimie, pour représenter l'élément, on utilise une lettre *majuscule*, suivie éventuellement d'une lettre *minuscule* : H, He, C, Ca, Co, etc. Cela permet de nommer les 92 éléments naturels connus, plus tous les autres éléments artificiels découverts.

Le noyau d'un élément chimique noté X est symbolisé par :

$$^{A}_{Z}\mathrm{X}$$

Z est le nombre de nombre de protons ;

A est le nombre de nombre de nucléons ;

($N = A - Z$ est le nombre de nombre de neutrons).

Exemples : $^{238}_{92}\mathrm{U}$ $^{14}_{6}\mathrm{C}$ $^{127}_{53}\mathrm{I}$

L'élément carbone est présent à l'état naturel sous forme de trois isoto :

$^{12}_{6}\mathrm{C}$ (98,90 %) $^{13}_{6}\mathrm{C}$ (1,10 %) $^{14}_{6}\mathrm{C}$ (traces)

Les pourcentages correspondent à l'abondance naturelle (pourcentage en masse de chaque isotope, dans un échantillon naturel quelconque d'atomes), quasi constante, quelleque soit l'origine de l'élément. Le carbone 14 est à l'état de traces uniquement, parce qu'il se désintègre spontanément.

Des noyaux sont appelés **isotopes** s'ils ont le même nombre de protons Z, mais des nombres de neutrons N différents.

Des isotopes sont donc des versions plus ou moins « lourdes » du même élément.

Équilibrer les équations des réactions nucléaires

Lors d'une réaction nucléaire, il y a conservation du nombre de nucléons A et du nombre de charges Z.

Équation générale d'une réaction nucléaire :

$$^{A_1}_{Z_1}\mathrm{X} + {}^{A_2}_{Z_2}\mathrm{Y} \rightarrow {}^{A_3}_{Z_3}\mathrm{W} + {}^{A_4}_{Z_4}\mathrm{P}$$

X et Y sont les noyaux père, W et P sont les noyaux fil.

La conservation de la charge s'écrit : $Z_1 + Z_2 = Z_3 + Z_4$ (autant de protons dans les réactifs que dans les produits).

La conservation de la masse s'écrit : $A_1 + A_2 = A_3 + A_4$ (autant de nucléons dans les réactifs que dans les produits).

Voici un exemple de réaction de fission :

$$^{1}_{0}\mathrm{n} + {}^{235}_{92}\mathrm{U} \longrightarrow {}^{94}_{38}\mathrm{Sr} + {}^{140}_{54}\mathrm{Xe} + 2\,{}^{1}_{0}\mathrm{n}$$

Pour écrire ces réactions, il peut être nécessaire de disposer d'un tableau périodique des éléments, afin de connaître le symbole des éléments (ils sont classés par numéro atomique Z croissant).

Application directe : écrire l'équation de fission de l'uranium 235 en yttrium et en iode 131, avec formation de trois neutrons.

Cachez la ré

$$^{1}_{0}\mathrm{n} + {}^{235}_{92}\mathrm{U} \longrightarrow {}^{102}_{39}\mathrm{Y} + {}^{131}_{53}\mathrm{I} + 3\,{}^{1}_{0}\mathrm{n}$$

2 Quelles sont les réactions nucléaires au sein du Soleil ?

Principe général Les réactions de fusion nucléaire sont typiques du fonctionnement d'une étoile comme le Soleil et sont à l'origine de l'énorme quantité d'énergie rayonnée par cet astre. Ce type de réaction consiste en la fusion de deux noyaux atomiques légers en un noyau plus lourd, fusion qui s'accompagne d'une libération importante d'énergie. Une telle réaction n'intervient qu'à des températures élevées (plusieurs dizaines de millions de degrés Celsius) avec des atomes dans un état très condensé (un plasma).

La fusion... sur Terre ! Si le mécanisme de fusion nucléaire a pu être reproduit dans les bombes thermonucléaires (dites « bombe H »), la fusion contrôlée en vue de produire de l'énergie en est toujours au stade de la recherche.

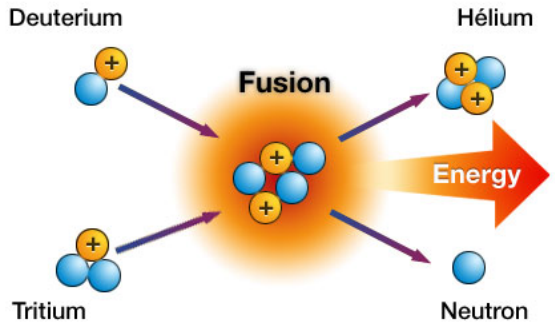


FIG. 2 – Fusion d'un deutérium et d'un tritium.

Depuis une trentaine d'années, de nombreux laboratoires étudient la fusion de deux noyaux légers comme ceux du deutérium et du tritium qui sont deux isotopes de

l'élément hydrogène. Le deutérium et le tritium ont un noyau avec un proton ($Z = 1$) et respectivement 1 et 2 neutrons.

Les noyaux sont portés à plus de 100 millions de degrés dans des machines toriques appelées Tokamak. Le mélange de deutérium et de tritium y est confiné à l'intérieur de parois immatérielles créées par des champs magnétiques intenses.

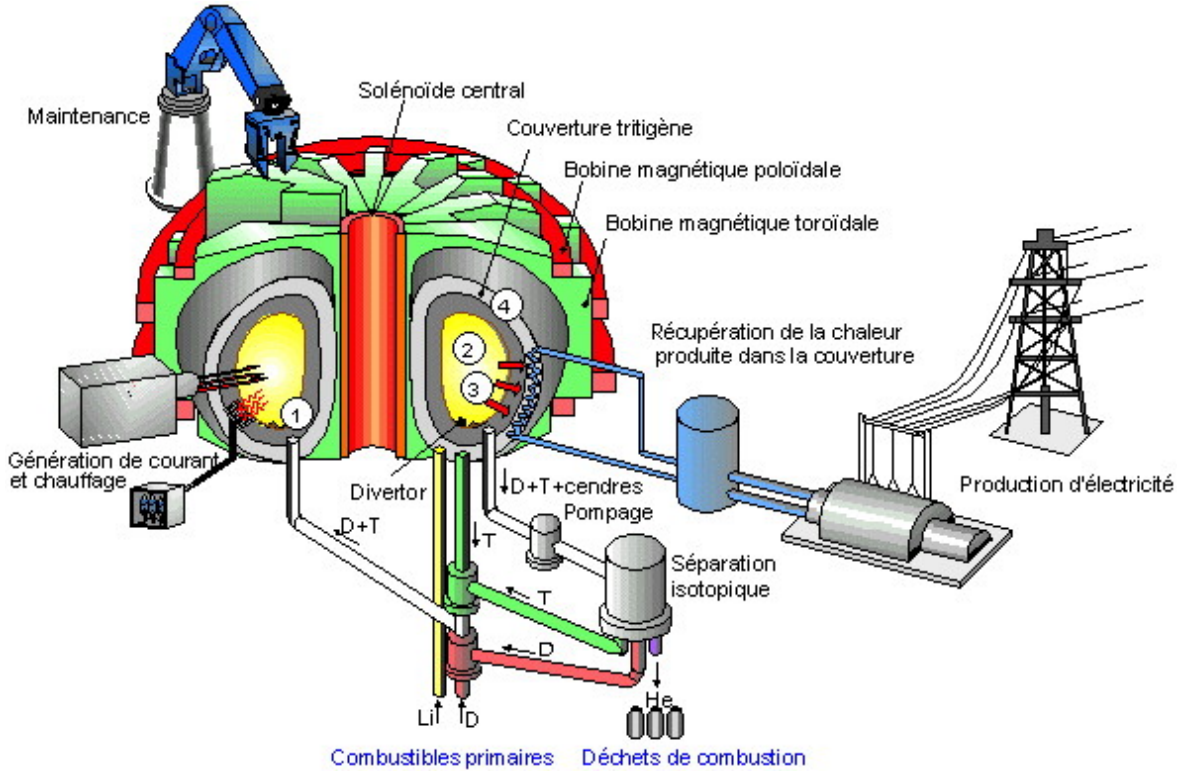


FIG. 3 – Schéma de principe du réacteur expérimental de fusion ITER.

Le projet ITER Le projet ITER (International Experimental Thermonuclear Reactor), lancé en 1986, a pour but de démontrer la possibilité scientifique et technologique de la production d'énergie par la fusion des atomes.

Avec 12,4 m de diamètre et 27 m de haut, ce réacteur, en construction dans le sud de la France à Cadarache, devrait permettre de réaliser la fusion du deutérium et du tritium. La première génération de réacteurs à fusion industriels devrait voir le jour vers 2050.

Équilibrer les équations des réactions nucléaires de fusion Le principe est le même que pour une réaction de fission. Exemple avec la réaction entre le deutérium et le tritium :

$$^{2}_{1}\mathrm{H} + ^{3}_{1}\mathrm{H} \longrightarrow ^{4}_{2}\mathrm{He} + ^{1}_{0}\mathrm{n}$$

Cette réaction libère 17,6 MeV (ce qui est énorme).

Application directe : écrire l'équation de fusion de deux noyaux de deutérium, pour former du tritium et un autre noyau fils que l'on découvrira.

Cachez la ré

$$^{2}_{1}\mathrm{H} + ^{2}_{1}\mathrm{H} \longrightarrow ^{3}_{1}\mathrm{H} + ^{1}_{1}\mathrm{H}$$

FIG. 4 – Un moment historique : la pause de la dernière tuile thermique dans ITER, par trois types en pyjamas.

3 Quel est le problème avec les déchets radioactifs ?

3.1 Ils sont là pour longtemps !

Première idée importante : certains déchets radioactifs vont mettre du temps à disparaître !

La production d'électricité d'origine nucléaire engendre des déchets.

Ces déchets sont radioactif pendant une durée qui peut être estimée à partir de la demi-vie $t_{1/2}$ (parfois aussi appelée période) de l'élément considéré. Celle-ci correspond au temps au bout duquel l'activité (nombre de désintégrations par seconde) a été divisée par deux.

> La **demi-vie radioactive** $t_{1/2}$ est la durée au bout de laquelle la **moitié** des noyaux de l'échantillon radioactif présents à la date t se sont désintégrés.

À chaque fois que l'on compte le temps $t = t_{1/2}$, le nombre de noyaux radioactifs est divisé par deux. Ainsi le nombre de noyaux radioactifs décroît avec le temps :

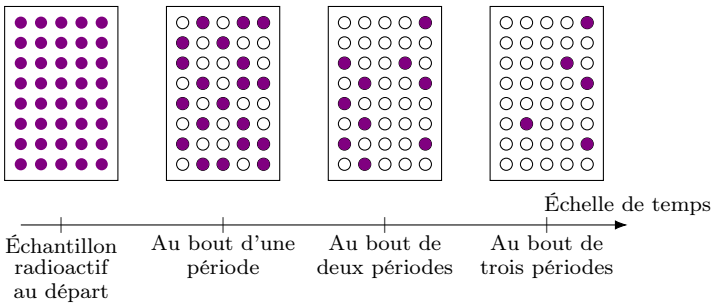


FIG. 5 – Illustration symbolique de la disparition des noyaux radioactifs. Admirez le travail d'orfèvre.

Voici quelques valeurs de demi-vie pour quelques nucléides instables :

Radionucléides		$t_{1/2}$
Iode 131	^{131}I	8 jours
Cobalt 60	^{60}Co	5,2 ans
Strontium 90	^{90}Sr	28,1 ans
Césium 137	^{137}Cs	30 ans
Plutonium 239	^{239}Pu	24 100 ans
Iode 129	^{129}I	16×10^6 ans
Uranium 238	^{238}U	$4,5 \times 10^9$ ans

FIG. 6 – Demi-vie de quelques isotopes instables.

On peut représenter le nombre de noyaux radioactifs restants en fonction du temps, par exemple pour le césium 137, dont la demi-vie est de 30 ans :

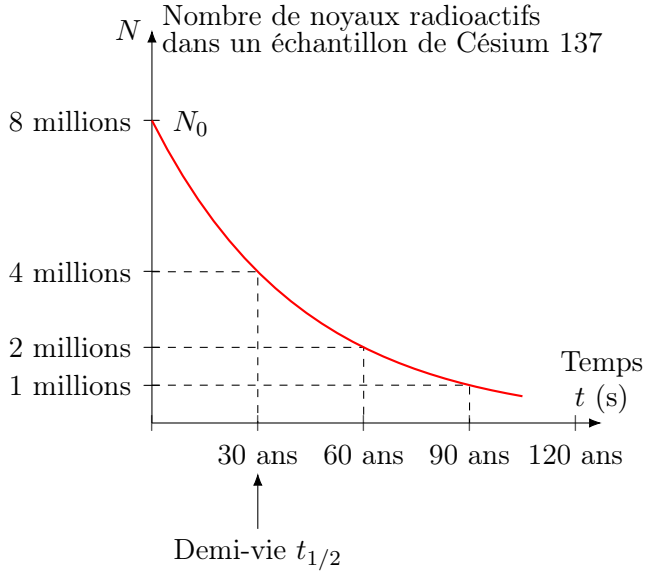


FIG. 7 – Décroissance radioactive du nombre de noyaux.

Consigne : à l'aide de la courbe ci-après, déterminez la demi-vie du plutonium 241. Le tracé doit être apparent sur votre copie !

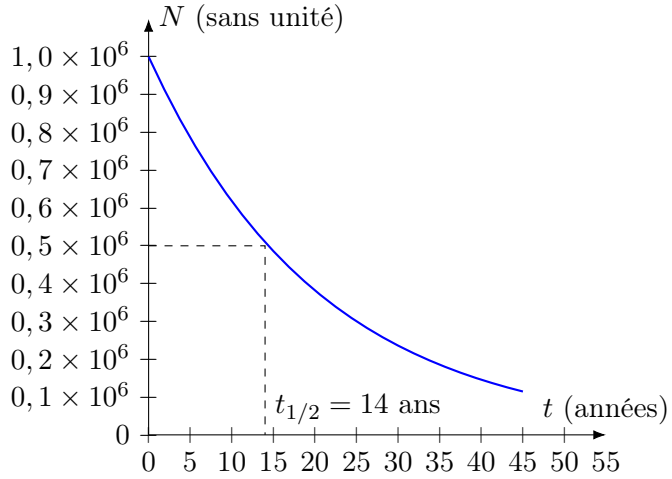


FIG. 8 – Décroissance radioactive du nombre de noyaux de plutonium 241 (Bac 2014).

3.2 Certains déchets radioactifs sont plus dangereux que d'autres !

Deuxième idée importante : tous les déchets nucléaires ne se valent pas !

Les produits de fission sont en général instable c'est-à-dire qu'ils se transforment naturellement en d'autres noyaux en émettant des rayonnements. On distingue deux types de déchets radioactifs :

Les déchets à faible vie et à forte activité ;

Les déchets à longue vie et à faible activité.

Actuellement, le traitement des déchets consiste à séparer les deux types mentionnés et à les stocker de façon adéquate.

3.3 Il existe des tas d'unités différentes pour mesurer la dangerosité des déchets radioactifs !

Troisième idée importante : pour caractériser une source, on utilise l'activité, ou nombre de désintégration par seconde.

L'activité $\mathcal{A}$ d'une source est simplement le nombre moyen de désintégrations par seconde dans l'échantillon. Elle s'exprime en becquerels (Bq), avec :

1 Bq = 1 désintégration par seconde

et se mesure avec un compteur Geiger.

FIG. 9 – Compteur Geiger.

Voici quelques exemples de valeurs :

Source	Activité (Bq)
1 litre d'eau	10
1 litre de lait	80
1 kg de granit	1 000
1 homme de 70 kg	10 000
50 kg d'engrais phosphatés	100 000
1 g de plutonium	2×10^6
1 scintigraphie thyroïdienne	$3,7 \times 10^7$

FIG. 10 – Exemples d'activités.

Ces valeurs sont énormes, toujours en raison du nombre d'Avogadro, il faut retenir qu'une activité de plusieurs millions de becquerels n'a rien de bien exceptionnel.

Les effet dépendent de l'activité $\mathcal{A}$ de la source, de l'énergie du rayonnement émis et de la manière dont ce rayonnement est absorbé. Pour tenir compte de ces paramètres, d'autres unités sont utilisées (en particulier le sievert, symbole Sv).

Les sources les plus dangereuses sont :

- les sources de très faible durée de vie ($t_{1/2}$ petit donc $1/t_{1/2}$ grand, donc activité grande) ;
- les sources contenant un grand nombre d'atomes radioactifs (N grand donc activité grande).

Les déchets à vie courte (inférieure à 300 ans) ou de faible activité sont stockés dans des fûts en acier ou en béton.

Les déchets à vie longue (des milliers d'années) ou de haute activité sont coulés dans du bitume ou du verre.

3.4 Les ressources fissiles sont limitées !

Quatrième idée importante : l'uranium est un combustible fossile comme les autres !

Au rythme de la consommation actuelle, les réserves connues d'uranium seront épuisées dans un siècle.

Une autre solution testée par les américains dans les années 60 consiste à utiliser le rhodium pour créer de l'uranium 233 dans un réacteur à sels fondus. Les réserves françaises en rhodium sont suffisantes pour dix siècles ! Mais ce réacteur nucléaire a comme défaut de compliquer singulièrement la récupération du plutonium, un déchet radioactif produit par les réacteurs actuels, et dont les militaires ont besoin pour continuer à fabriquer des bombes « nucléaires ».

3.5 Est-ce dangereux ? Oui !

Cinquième idée importante : les réacteurs nucléaires actuels sont très dangereux.

En effet, ces réacteurs peuvent s'emballer d'eux-même et mener à des accidents irréversibles. En particulier, si le combustible à base d'uranium vient à ne plus être refroidi correctement, il va fondre et percer la cuve (qui explose d'ailleurs bien avant). L'horreur produite porte le nom de « corium ». Rien ne peut arrêter la réaction en chaîne dans le corium, qui peut tout traverser, et va s'enfoncer indéfiniment dans le sol. On estime actuellement qu'il faudrait trouver mille volontaires pour chaque réacteur français, pour travailler comme liquidateurs, pour chacun des accidents à venir.

Une autre solution est le réacteur à sels fondus, qui s'arrête de lui-même, ne peut pas exploser, se colmate tout seul en cas de fuite. Mais une telle solution, comme dit précédemment, ne permet pas de récupérer facilement le plutonium et donc de créer des bombes.

4 Étude expérimentale de piles

4.1 La pile Daniell

La pile Daniell a été inventée par le chimiste britannique John Daniell en 1836 au moment où le développement du télégraphe faisait apparaître un besoin urgent de sources de courant sûres et constantes.

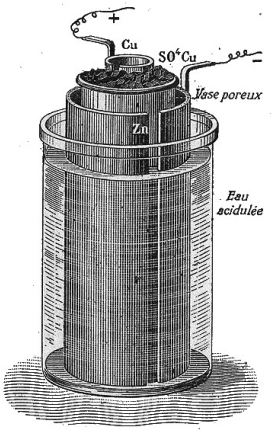


Fig. 11 – Élément Daniell.

La pile électrique Daniell est constituée d'une anode (lame de zinc plongée dans une solution contenant du sulfate de zinc) et d'une cathode (lame de cuivre plongée dans une solution contenant du sulfate de cuivre).

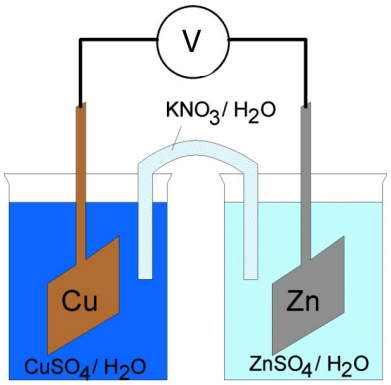


Fig. 12 – Montage expérimental.

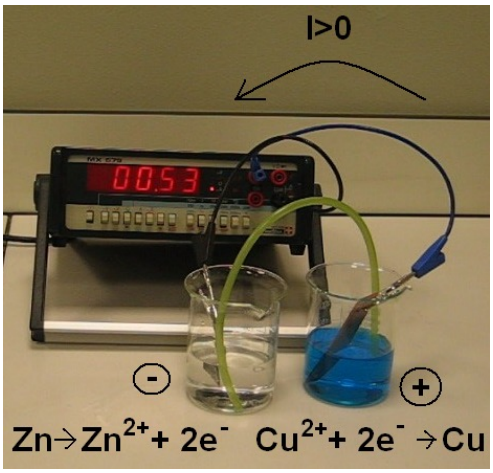


Fig. 13 – Photographie et réactions aux électrodes.

Les deux solutions sont reliées par un pont salin (solution de chlorure de potassium $K^+_{(aq)} + C\ell^-_{(aq)}$ ou de nitrate de potassium $K^+_{(aq)} + NO^-_{3\,(aq)}$ qui sert à équilibrer les charges.

4.2 Fabrication d'une pile, mesure de l'intensité débitée

- Décaper les lames.
- Introduire chaque lame, seule, dans sa solution d'ions correspondante :
  - lame de zinc dans la solution de sulfate de zinc ;
  - lame de cuivre dans la solution de sulfate de cuivre.

  On a ainsi réalisé des demi-pile. Dans chaque demi-pile, la partie métallique constitue une électrode.
- Relier les demi-piles cuivre et zinc par un pont salin, constitué par un tube en U rempli d'un gel au sein duquel des ions (en général potassium K^+ et nitrate NO^-_3) peuvent migrer pour assurer le transport des charges. On peut aussi réaliser le pont salin simplement par une bande de papier-filtre imbibée d'une solution de nitrate de potassium, par exemple. On a ainsi réalisé une pile !
- Brancher directement la pile précédente aux bornes d'un voltmètre.
- Noter la tension (appelée *force électromotrice* ou f.é.m.) et le sens.

Tension : 1,5 volt ⊕ pour le cuivre, ⊖ pour le zinc.

4.3 Chaîne énergétique d'une pile

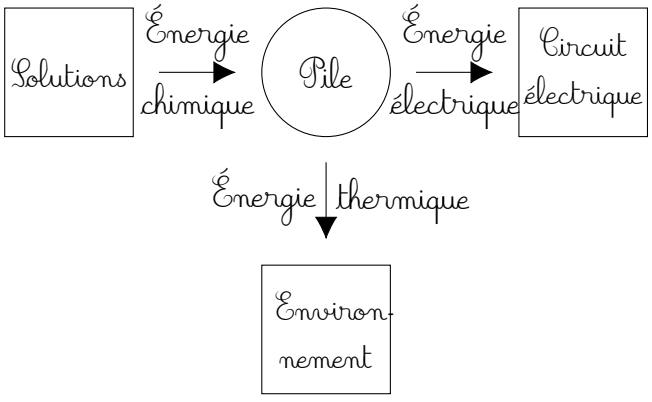


Fig. 14 – Chaîne énergétique d'une pile.

5 Comment optimiser et gérer notre utilisation de l'énergie électrique ?

5.1 Le stockage de l'électricité

Le stockage de l'énergie électrique n'est pas possible directement : il faut la transformer en une énergie différente (mécanique, électrochimique...) stockable, puis opérer une seconde transformation pour la convertir à nouveau sous sa forme initiale. Quelles sont les technologies qui permettent ce stockage ?

5.2 Les accumulateurs

Les accumulateurs sont des « piles rechargeable ».

La technologie des accumulateurs « Lithium ion » actuellement utilisés dans les téléphones portables, les ordinateurs et le petit électroménager, a été conçu pour la jeep lunaire des missions « Apollo » voilà cinquante ans.

La densité d'énergie de ces accumulateurs de nouvelle génération peut atteindre 300 $\mathrm{Wh \cdot kg^{-1}}$, à comparer aux 50 $\mathrm{Wh \cdot kg^{-1}}$ des accumulateurs au plomb des voitures (les « batteries », car ce sont six éléments de 2 V mis en série pour donner 12 V).

Nota bene : densité d'énergie du pétrole brut : 12 $\mathrm{kWh \cdot kg^{-1}}$!

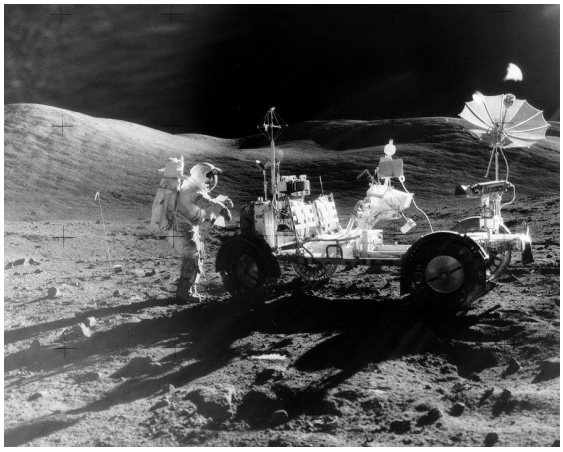


Fig. 15 – La jeep lunaire d'Apollo 11.

5.3 Les piles à combustible

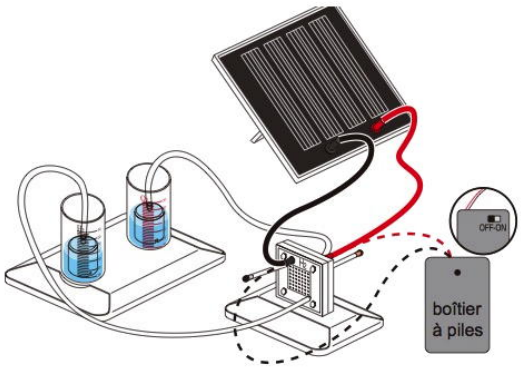


Fig. 16 – Charge de la pile à combustible.

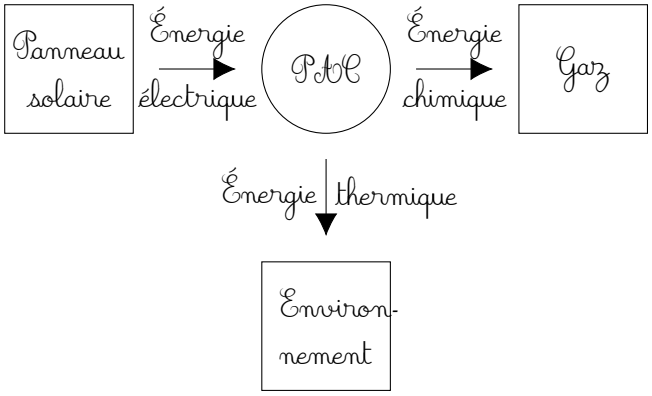


Fig. 17 – Lors de la charge.

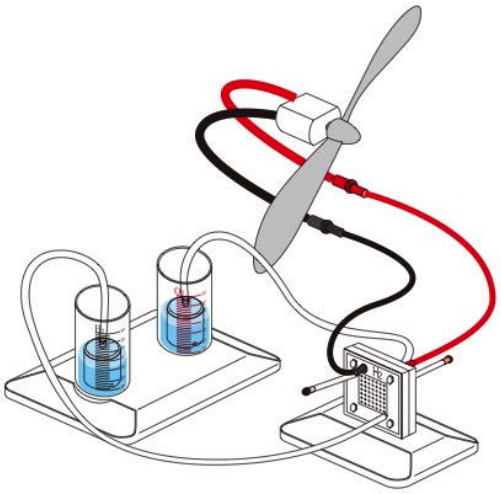


Fig. 18 – Décharge de la pile à combustible.

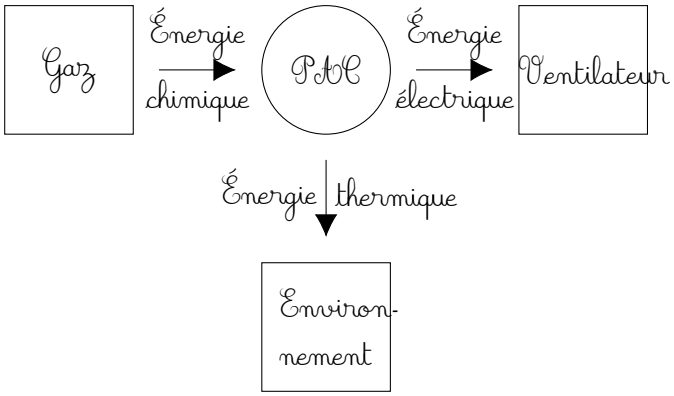


Fig. 19 – Lors de la décharge.

Lorsqu'elle se recharge, par électrolyse de l'eau, la pile à combustible convertit de l'énergie électrique en énergie chimique . Pour cette recharge, un source « intermittente » comme l'énergie solaire peut être utilisée. La réaction lors de la charge est :

$$\mathrm{H_2O} + \text{énergie} \rightarrow \mathrm{H_2} + \frac{1}{2}\mathrm{O_2}$$

Lorsqu'elle se décharge, la pile à combustible convertit de l'énergie chimique en énergie électrique . Le combustible peut être du dihydrogène, qui réagit avec le dioxygène de l'air (en

présence d'un catalyseur comme le platine). La réaction lors de la décharge est :

$$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \quad \rightarrow \quad H_2O + \text{énergie}$$

Ainsi on remarque qu'un accumulateur est *réversible*, contrairement à une simple pile, qu'il faut recycler une fois déchargée.

Le développement des piles à combustible pour les automobiles passe par la maîtrise du *stockage* du dihydrogène.

5.4 Les lacs et les barrages

Les lacs et barrages permettent aussi de *stocker* de l'énergie. Ce sont les STEP, Stations de Transfer d'Énergie par Pompage, des dispositifs de stockage massifs.

Voici (page suivante) l'exemple du barrage de Grand-Maison, qui comporte un bassin supérieur à 1700 m d'altitude, et un lac inférieur à 770 m d'altitude. Cette centrale électrique a une puissance de 1800 MW. Elle peut fonctionner de deux façons :

- *production* d'électricité en turbinant normalement l'eau provenant de l'amont ;
- *consommation* d'énergie en inversant le fonctionnement des turbines et en pompant l'eau de l'aval vers la retenue en amont.

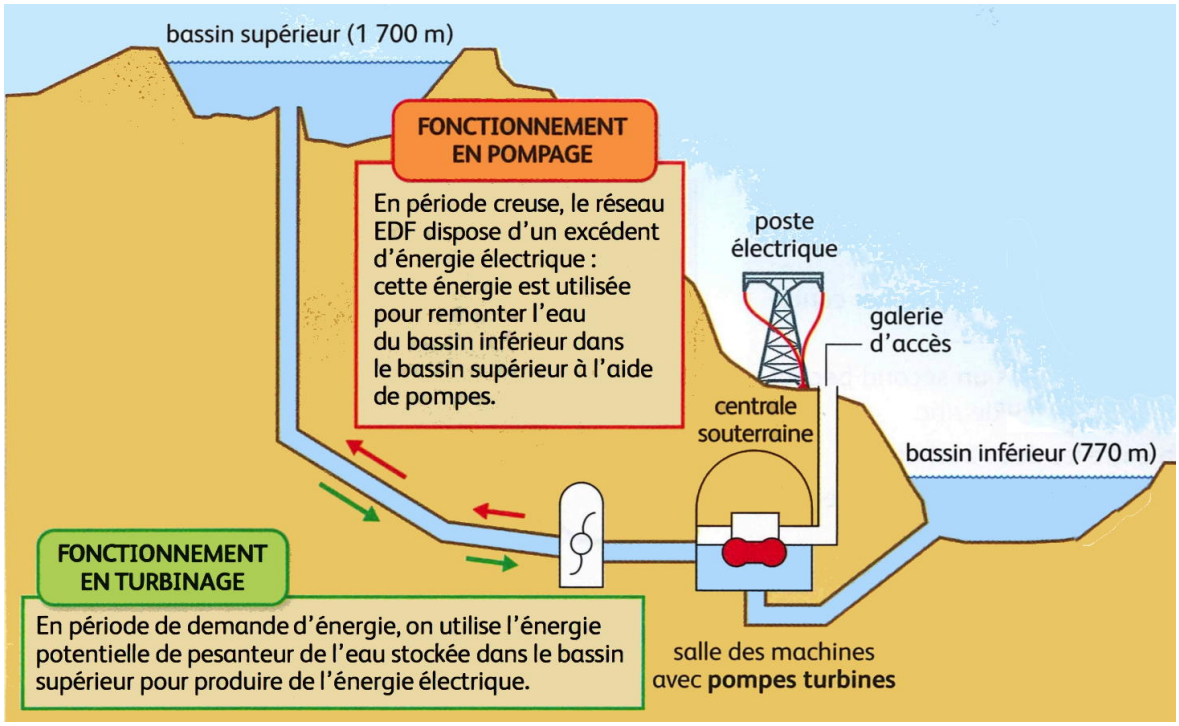


FIG. 20 – Schéma de principe du barrage de Grand-Maison.

5.5 Les supercondensateurs

- Un condensateur est formé de deux plaques de très grandes surfaces, séparées par un isolant très mince, le tout étant enroulé pour occuper moins de place.

- Ce composant (relativement courant dans les appareils électriques) permet de *stocker* des charges électriques sans aucune réaction chimique et quasiment sans aucune perte. En revanche il est difficile d'emmagasiner des grandes quantités d'énergie par ce moyen.

- Il s'agit d'un stockage purement *électrique* : les charges $\oplus$ et $\ominus$ sont simplement placées sur les plaques en regard l'une de l'autre en branchant le condensateur sur une source de courant : c'est la *charge*. Voici un schéma de principe du composant :

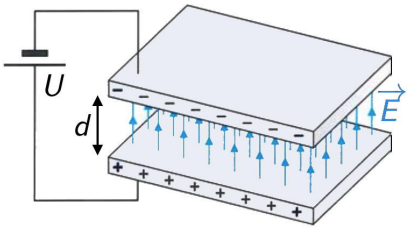


FIG. 21 – Condensateur chargé sous une tension constante. Il règne un champ électrique entre les plaques, mais les charges $\oplus$ et $\ominus$ restent sur les plaques tant que l'isolant (entre les plaques) tient le coup.

- Tant que l'on ne branche pas le condensateur à un circuit extérieur, cette charge peut être conservée assez longtemps. Elle peut être délivrée très rapidement à un circuit extérieur lors de la *décharge* : on peut atteindre une puissance *très élevée*, entre 1000 $W \cdot kg^{-1}$ et 5000 $W \cdot kg^{-1}$!

FIG. 22 – Condensateur utilité dans les montages électriques.

- Beaucoup de dispositifs d'utilisation courante peuvent utiliser des condensateurs : flash des appareils photos, tubes fluorescents (« néons »), sauvegarde de l'alimentation le temps de changer les piles dans vos calculatrices... Ces condensateurs sont capables de délivrer des courants de l'ordre de quelques milliampères pendants quelques secondes ou quelques minute.
- Une idée actuellement au stade de test consiste à utiliser des « supercondensateurs » pour aider au démarrage d'un véhicule électrique.

  Par exemple, une pile à combustible de 20 kW est suffisante pour faire rouler un véhicule électrique mais insuffisante pour permettre au véhicule d'avoir des performances correctes dans les phases de démarrage et d'insertion dans une file du trafic.

  C'est là que les supercondensateurs prennent le relais, en stockant l'énergie électrique pendant les phases de freinage ou de mouvement uniforme, pour la re dans les phases d'accélération.

5.6 Stocker permet de gérer les pics de demande d'électricité

Voici en figure 18 une courbe représentant la puissance électrique consommée en France lors d'une journée ensoleillée en hiver.

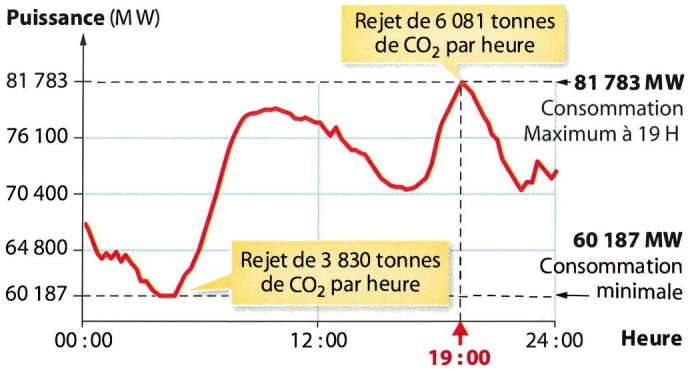


FIG. 23 – Évolution de la puissance consommée sur une journée.

Sur le réseau électrique, production et consommation doivent être égale à tout instant, pour éviter les délestages (ruptures d'alimentation). Les centrales prioritairement utilisées pour répondre à la demande sont celles dont le coût de fonctionnement est le plus faible.

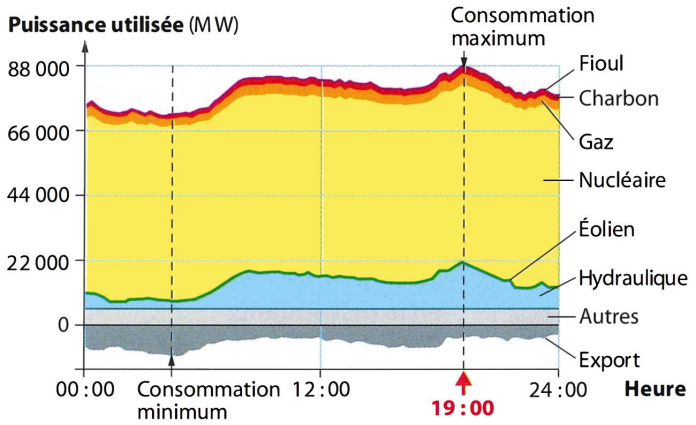


FIG. 24 – Puissance produite par filière, sur une journée.

Ainsi, stocker l'énergie permet de diversifier le bouquet énergétique en aidant à s'intégrer les énergie velable, tout en diminuant l'utilisation des énergie fo .

5.7 Les inconvénients d'un stockage de l'électricité

Toutes ces technologies de stockage présentent des inconvénient : leur coût, éventuellement leur faible capacité de stockage (accumulateurs) ou leur empreinte au sol (STEP), leur aspect polluant (acides et plomb dans les accumulateurs), etc.

Les domaines d'utilisation de chacune des technologies actuellement techniquement maîtrisées sont indiqués sur la figure ci-dessus, représentant la puissance qui peut être délivrée en fonction de l'énergie stockée (chaque échelle étant par unité de masse de stockage).

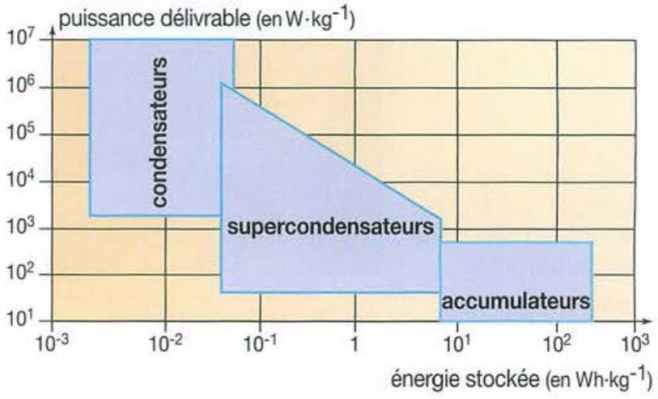


FIG. 25 – Domaines d'utilisation des solutions de stockage de l'électricité.

6 Quelles sont les conséquences écologiques de notre consommation d'énergie ?

Apparu au début des années 1970, le concept d'empreinte environnementale traduit l'impact de l'activité humaine sur les écosystèmes. Parmi tous les impacts, celui de l'accroissement énorme de la quantité de *gaz* à *effet* de *serre* (GES en abrégé) rejetés dans l'atmosphère est l'un des plus préoccupants.

Le phénomène d'effet de serre est *naturel* et permet la vie sur Terre ! Sans cet effet, la température moyenne de la Terre serait de −18 °C. Le problème est dans l'emballement de cet effet, en raison des rejets *anthropiques* !

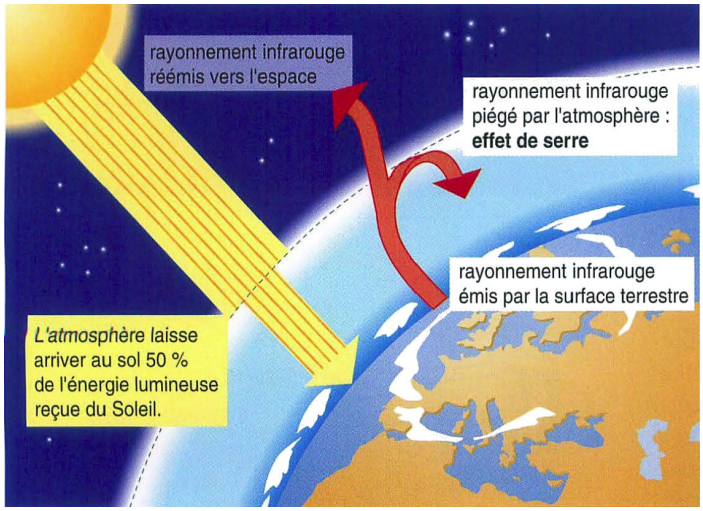


FIG. 26 – L'effet de serre correspond au piégage des rayons infrarouges émis par le sol.

L'atmosphère laisse pénétrer 50 % de l'énergie lumineuse reçue du Soleil. Le sol terrestre ainsi chauffé émet à son tour des rayonnements *infrarouge* qui sont partiellement piégés par l'atmosphère, à la façon d'une vitre dans une serre horticole (d'où le nom de l'effet en question).

L'émission de dioxyde de carbone d'origine anthropique (= produits par l'homme) a plusieurs sources qui sont indiquées sur la figure ci-dessous, en fonction des années.

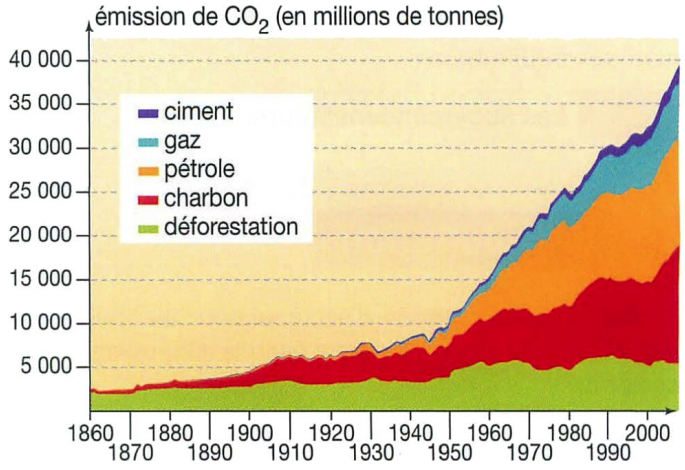


FIG. 27 – Évolution et origine des émissions mondiales de CO_2 de 1860 à 2008, en millions de tonnes.

Les différents GES (= gaz à effet de serre) sont émis par différents secteurs de l'activité humaine, indiqués sur la figure suivante.

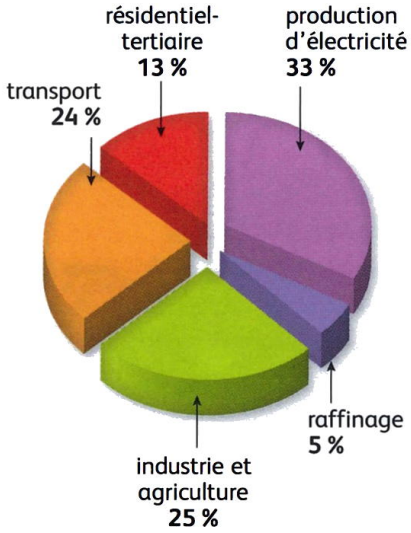


FIG. 28 – Origine anthropique des GES.

De plus, tous les gaz à effet de serre ne se *valent* pas ! Certains ont un effet quintuple par rapport à d'autres. Les principaux gaz à effet de serre sont :

- le *dioxyde* de *carbone* CO_2 ;
- le *méthane* CH_4 ;
- l'*eau* H_2O ;
- N_2O ;
- l'ozone O_3 ;
- les CFC (chlorofluorocarbones) ;
- ...

Les gaz à effet de serre sont responsables du phénomène de *réchauffement* climatique, un changement du climat extrêmement rapide par rapport à la normale.

Le climat terrestre change constamment, en raison des variations d'activité solaire et surtout en raison des variations d'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre par rapport au plan de l'écliptique, mais ces changements se font d'ordinaire à l'échelle des temps géologique.

Pour l'instant on estime que la température moyenne terreste devrait augmenter de 4 à 5 °C d'ici à 2050. Cela semble faible, mais en pratique les modifications du climat pourraient être assez sensibles.

Correction des exercices de la séance 11

11.1 Les lampes basse consommation

1. La grandeur physique exprimée en kWh dans le document 1 est l'énergie (remarque : c'est le titre de la partie du trimestre 2).

L'unité SI de l'énergie est le joule (symbole J).

2. Pour comparer les lampes de façon pertinente, il faut utiliser l'efficacité lumineuse, exprimée en lumen par watt (remarque : cette réponse était clairement donnée dans le document 2, il suffit de savoir lire...).

3. Calcul de l'efficacité lumineuse de chacune des trois lampes du document 3, en utilisant la définition du document 2 :

$$\text{Lampe LED} \qquad \frac{420}{6} = 70 \text{ lumen/watt}$$

$$\text{Fluo-compacte} \qquad \frac{450}{9} = 50 \text{ lumen/watt}$$

$$\text{À incandescence} \qquad \frac{400}{40} = 10 \text{ lumen/watt}$$

On constate que la lampe à incandescence a une efficacité lumineuse bien moindre que les deux autres lampes. Ceci justifie son interdiction.

4. La durée d'utilisation des lampes est $t = 20\,000$ h.

La puissance des deux lampes est respectivement $\mathcal{P} = 6$ W ou $\mathcal{P} = 9$ W.

La formule du cours permettant de calculer l'énergie E est :

$$E = \mathcal{P}t$$

Unités : si la puissance $\mathcal{P}$ est exprimée en watt (W) et la durée t est exprimée en heure (h), l'énergie E est exprimée en wattheure (Wh).

Appliquons cette formule pour calculer l'énergie dépensée par chacune des deux lampes, sans omettre de convertir les Wh en kWh :

$$\begin{array}{lll} E = 6 \times 20\,000 & \text{ou} & E = 9 \times 20\,000 \\ E = 120\,000 \text{ Wh} & \text{ou} & E = 180\,000 \text{ Wh} \\ E = 120 \text{ kWh} & \text{ou} & E = 180 \text{ kWh} \end{array}$$

Le prix du kWh est indiqué à 0,10 €/kWh, donc le coût en électricité de chaque lampe se calcule facilement (ce calcul doit être indiqué) :

$$120 \times 0,10 = 12 \text{ €} \quad \text{ou} \quad 180 \times 0,10 = 18 \text{ €}$$

À ce coût de l'électricité il faut ajouter la dépense d'équipement, c'est-à-dire le coût d'achat et de remplacement éventuel de chaque lampe.

La lampe LED coûte 15 € et a une durée de vie de 20 000 heures, donc son coût sur cette durée est exactement celui de son achat, 15 €.

La lampe fluocompacte coûte 5 € et a une durée de vie de 6 000 heures, donc son coût sur une durée de 20 000 heures est facile à estimer par une simple proportionnalité (la fameuse règle de trois) :

$$\frac{5}{6\,000} \times 20\,000 = 16,67 \text{ €}$$

Il ne reste plus qu'à additionner les coûts, celui de la consommation électrique et celui des achats :

$$12 + 15 = 27 \text{ €} \quad \text{ou} \quad 18 + 16,67 = 34,67 \text{ €}$$

On constate que la lampe LED est plus économique à l'usage.

11.2 Les énergies alternatives

1. Explication des termes demandés :

Renouvelable Ressource énergétique qui se renouvelle plus vite qu'on ne l'utilise, ou qui est inépuisable.

Non renouvelable Ressource énergétique qui ne se renouvelle pas, ou tout au moins pas assez vite par rapport à la consommation.

Le document proposé présente le « large spectre de l'origine des sources d'énergie », liste qui comporte :

— principalement des sources énergies non renouvelables : pétrole 29 % et 11 %, charbon 24 %, méthane 19 % et nucléaire 8 %, pour un total de $29 + 11 + 24 + 19 + 8 = 91$ % ;

— quelques sources d'énergies renouvelables, 8 %.

Le total $91 + 8 = 99$ % ne fait pas 100 % car, comme précisé dans le texte, les chiffres ont été arrondis.

En conclusion, la part des énergies non renouvelables est de 92 %, et la part des énergies renouvelables de 8 %, ce qui est peu.

2. D'après le texte, l'utilisation de combustibles fossiles pour le transport ne représente que 28 % de la consommation totale de ces combustibles. C'est pourquoi ne se pencher que sur le problème du transport est insuffisant pour résoudre les problèmes d'émission de dioxyde de carbone CO_2 (sans même parler d'une quelconque solution de remplacement).

11.3 Produire son électricité avec le Soleil

1. a. Il n'est pas difficile de choisir deux exemples de source d'énergie fossile (pétrole, charbon...) dans toutes celles citées dans l'exercice précédent ! Bien entendu, au Bac ces deux exercices ne sont pas tombés en même temps... Mais là c'est Noël en avril. Vive moi. Lol.

b. Diminuer l'utilisation des énergies fossiles permettrait de diminuer la pollution engendrée (par exemple, l'émission de dioxyde de carbone CO_2 lors de leur combustion), ainsi que de préserver les ressources restantes.

2. Question 2 de l'annexe : choix 3 « l'énergie consommée en un an ». Cette question a réellement été posée en l'état ! Si vous avez répondu faux, diminuez votre consommation de drogue dure (ou simplement, dormez la nuit, et pas en cours...).

3. Question 3 de l'annexe : choix 3 « solaire photovoltaïque ». Aucune justification exigée, mais si vous voulez alimenter un téléviseur, il faut de l'électricité, donc il faut un panneau solaire photovoltaïque (il y a « volt » dedans, l'avez-vous noté !).

4. a. Le document 3 indique clairement une production d'énergie de 100 kWh pour une année, pour un panneau photovoltaïque.

b. La fabrication d'un panneau photovoltaïque nécessite une énergie de 250 kWh. Un panneau photovoltaïque produit 100 kWh par an. Il devient rentable au bout de :

$$\frac{250}{100} = 2,5 \text{ années}$$

5. D'après le document 2, les panneaux photovoltaïques permettent de produire de l'électricité de manière « non polluante ». Mais les étapes de fabrication et de recyclage des panneaux (document 3) ont un impact sur l'environnement : émission de gaz à effet de serre, rejets de produits chimiques.

De plus, même si leur utilisation comme ressource énergétique présente l'avantage d'utiliser une ressource inépuisable et abondante, leur coût est élevé (document 3), leur rendement est faible (document 3), ils sont encombrants (document 2), ils nécessitent une bonne exposition et n'offrent qu'une source d'énergie intermittente qu'il faut stocker.

Exercices pour la séance n° 13 ;-)

12.1 Les déchets radioactifs

Toute activité humaine produit des déchets. L'utilisation des propriétés de la radioactivité dans de nombreux secteurs engendre chaque année des déchets radioactifs. Ces déchets émettent de la radioactivité et présentent des risques pour l'homme et l'environnement.

Ces déchets proviennent pour l'essentiel des centrales nucléaires, des usines de traitement des combustibles usés ainsi que des autres installations nucléaires civiles et militaires qui se sont développées au cours des dernières décennies.

On compte également plus de 1 000 petits producteurs qui contribuent aussi, à un degré moindre, à la production de déchets radioactifs : laboratoires de recherche, hôpitaux, industries...

Les déchets radioactifs sont variés. Leurs caractéristiques diffèrent d'un déchet à l'autre : nature physique et chimique, niveau et type de radioactivité, durée de vie (ou période radioactive)... En France, les déchets radioactifs sont classés en fonction de leur mode de gestion, tel que montré dans le tableau 1 page 13.

On s'intéresse aux activités massiques de quelques éléments présents dans les déchets d'une centrale nucléaire, tableau 2 page 13.

a. En France, la classification des déchets radioactifs repose sur deux paramètres. Identifier ces deux paramètres.

b. En utilisant les tableaux 1 et 2, expliquer comment, en France, on gère les déchets radioactifs tels que l'uranium 235.

12.2 L'extraction du gaz de schiste

Le méthane CH_4 est présent sous différentes formes dans la nature.

On peut le trouver dans des gisements de gaz naturel (dont le méthane est le constituant principal), en Algérie ou en Sibérie par exemple. C'est aussi le gaz de Lacq, nom de la ville du bassin Aquitain près de laquelle il était extrait jusqu'en 2013.

La « fontaine ardente », située sur la commune de Le Gua, en Isère, est aussi la preuve de l'existence de gisements. Elle est caractérisée par une flamme permanente à l'extrémité d'un tuyau, au sommet d'un tas de cailloux (visible sur la photo ci-contre).

Le méthane peut aussi être présent dans certains schistes(∗), piégé dans ses feuillets et microfissures. Ces roches constituent un réservoir de méthane, situé vers 2000 mètres de profondeur. Ce gaz est alors appelé « gaz de schiste ».

Fig. 29 – La fontaine ardente, commune de Le Gua, Isère, photographiée par Pierre Thomas.

<table>
<tr><td colspan="2" rowspan="2"></td><td colspan="3">Période radioactive</td></tr>
<tr><td>Vie très courte
(période $<$ 100 jours)</td><td>Vie courte
(période $<$ 31 ans)</td><td>Vie longue
(période $>$ 31 ans)</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Activité massique</td><td>Très faible activité
TFA
($<$ 100 Bq/g)</td><td rowspan="4">Gestion par décroissance radioactive sur le site de production puis évacuation dans les filières conventionnelles</td><td colspan="2">Stockage de surface
(Centre industriel de Regroupement, d'Entreposage et de Stockage — CIRES)</td></tr>
<tr><td>Faible activité
FA
($< 10^5$ Bq/g)</td><td rowspan="2">Stockage de surface (centre de stockage de l'Aube)</td><td>Stockage de faible profondeur
(à l'étude)</td></tr>
<tr><td>Moyenne activité
MA
($< 10^6$ Bq/g)</td><td rowspan="2"></td></tr>
<tr><td>Haute activité
HA
($> 10^6$ Bq/g)</td><td colspan="2">Stockage réversible profond
(à l'étude)</td></tr>
</table>

Table 1 – Gestion des déchets en France. L'activité massique est l'activité rapportée à 1 g d'échantillon.

Radioéléments	**Demi-vie $t_{1/2}$**	**Activité massique**
Iode 131	8 jours	4,6 millions de milliards de Bq/g
Césium 137	...	3,200 milliards de Bq/g
Plutonium 239	24 000 ans	2,3 milliards de Bq/g
Uranium 235	704 millions d'années	8 000 Bq/g

Table 2 – Quelques éléments présents dans les déchets d'une centrale nucléaire.

(∗) *schiste : roche qui a pour particularité d'avoir un aspect feuilleté.*

<u>Document 1</u> : le gaz de schiste

L'exploitation du « gaz de schiste » est en plein essor depuis l'année 2001, au Canada et aux États-Unis, dans la perspective d'une moindre dépendance énergétique. Ainsi, les États-Unis sont passés, en 2012, du quatrième au sixième rang dans le classement des importateurs nets de gaz. Dans le futur, les États-Unis pourraient, selon certaines prévisions, redevenir un exportateur d'énergie.

<u>Document 2</u> : information sur le méthane

Le méthane, comme tous les gaz à effet de serre, a une capacité d'absorption élevée du rayonnement infrarouge (environ 100 fois plus que celle du dioxyde de carbone CO_2).

<u>Document 3</u> : extraction du gaz de schiste par fracturation hydraulique.

Les numéros ci-dessous sont la légende de la figure 30 page 14.

1 Un puits est foré à plus de 2000 m de profondeur. Une fois la couche de schiste atteinte, le forage continue horizontalement sur un ou deux kilomètres.

2 Des explosions fissurent la roche.

3 Des milliers de litres d'un mélange d'eau et de substances chimiques toxiques sont injectés à hautes pressions pour agrandir les fissures. Il y a ensuite injection de particules de sable ou de céramique pour les empêcher de se refermer.

4 Le gaz de schiste s'engouffre dans le puits. Les eaux usées, chargées de substances toxiques sont évacuées.

5 Une partie non négligeable (environ 4 %) du gaz de schiste extrait s'échappe dans l'atmosphère à cause de fuites.

Source : *The New-York Times* – Al Granberg « Propublica ».

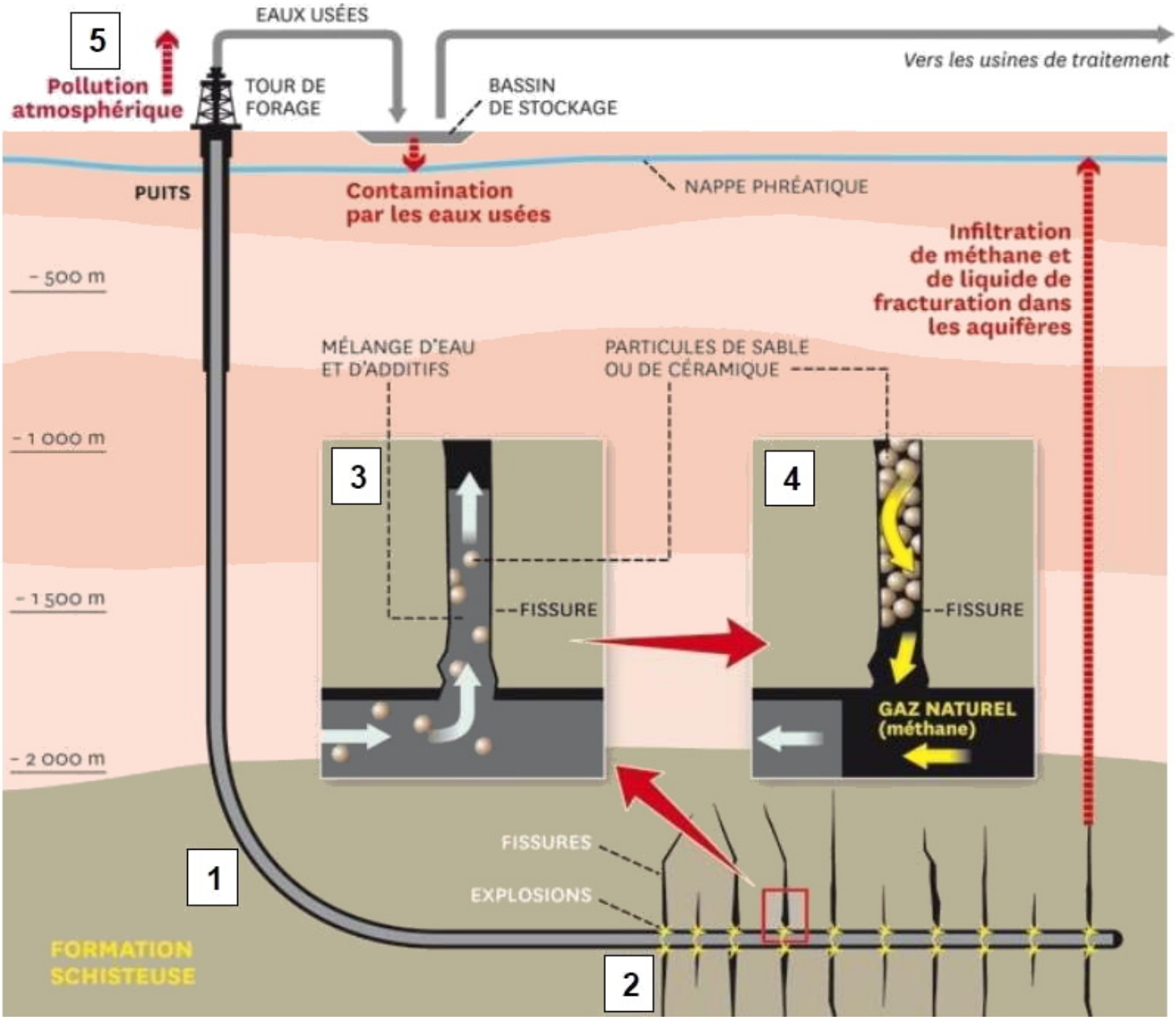


FIG. 30 – Extraction du gaz de schiste par fracturation hydraulique.

Répondre aux questions suivantes en utilisant les documents et vos connaissances.

1. Citer deux formes sous lesquelles le méthane peut se trouver dans le sous-sol.
2. Expliquer si le gaz de schiste est une source d'énergie renouvelable ou non renouvelable. Proposer une réponse argumentée.
3. Expliquer l'intérêt que peut avoir un pays comme les États-Unis à extraire du gaz de schiste.
4. L'exploitation du gaz de schiste présente des inconvénients en termes d'empreinte environnementale. Indiquer ces inconvénients pour les sols et les nappes phréatiques.
5. *« Le gaz de schiste est considéré comme un Gaz à Effet de Serre (GES), aussi bien lors de son exploitation que lors de son utilisation (combustion) ».*

   Justifier l'affirmation précédente en vous appuyant sur les documents et sur vos connaissances (vous illustrerez votre réponse en donnant notamment une équation de réaction chimique).

12.3 La cellule solaire « Annabelle »

Le saut démographique mondial (7 milliards d'habitants en juin 2011, plus de 9 milliards à l'horizon 2050), couplé au fort développement des pays en voie de développement, va se traduire par une augmentation de la consommation d'énergie mondiale (estimée au double de la consommation actuelle). Face à la demande, chercheurs et ingénieurs travaillent à d'autres solutions.

Document 1 : des cellules pas comme les autres...

Les cellules solaires traditionnelles convertissent la lumière en électricité en exploitant l'effet photovoltaïque.

Un professeur de l'université de Tokyo a mis au point des cellules photovoltaïques capables de stocker l'électricité. Il en a fait des objets de décoration.

Une cellule solaire nommée « Annabelle », du nom d'une variété d'hortensia, ressemble à un tableau (*cf.* illustration ci-contre) représentant cette fleur dont les pétales bleuissent au soleil.

Au-delà de ce changement de couleur, cette cellule est également capable de stocker de l'énergie, et permet de recharger deux fois un téléphone portable. Une fois que la cellule est vidée de son énergie, les pétales bleus des motifs floraux de la cellule-tableau deviennent blancs.

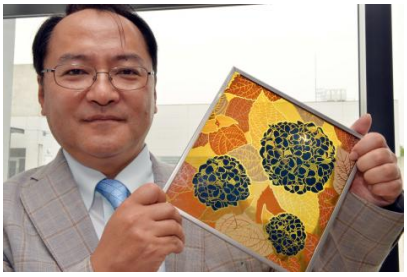


FIG. 31 – Anabelle.

D'après *Les techniques de l'ingénieur – vite s'informer*, 21 août 2014.

Document 2 : le thorium, futur nucléaire vert ?

Tout comme l'uranium 238 (isotope $^{238}_{92}\text{U}$) dont il est la seule alternative, le thorium est parfois considéré comme l'avenir du nucléaire. À Grenoble, les chercheurs du LPSC (Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie) travaillent sur un réacteur à sels fondus fonctionnant au thorium, le « *molten salt fast reactor* ».

Infiniment plus abondant dans la nature que l'uranium 235 fissile usuellement utilisé, le thorium peut être transformé par une suite de réactions nucléaires, en uranium 233 également fissile. D'où l'idée de développer des réacteurs surgénérateurs fonctionnant au thorium, *« ce qui résoudrait tous les problèmes de ressources énergétiques pour les 10 siècles à venir »*, indique Elsa MERLE-LUCOTTE, enseignante à Grenoble et chercheuse au LPSC.

« Enfin, les réacteurs au thorium réduiraient naturellement la production de déchets à vie longue. Les déchets produits par les réacteurs au thorium sont radioactifs pendant 10 à 15 ans seulement dans leur grande majorité, et seule une fraction de 0,01 % est radioactive durant des milliers d'années. »

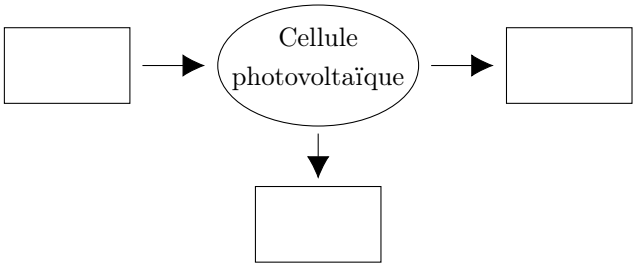
D'après *Grenoble IN'Press*, Institut Polytechnique de Grenoble.

Répondre aux questions suivantes sans vous emmêler les pinceaux et en étalant vos connaissances au max !

1.1. Indiquer si la ressource énergétique utilisée par les cellules solaires est renouvelable ou non renouvelable. Justifier brièvement la réponse.

1.2. Recopier sur votre copie la chaîne énergétique ci-dessous correspondant à la production d'électricité par une cellule photovoltaïque classique.

La compléter en précisant dans les rectangles la nature des énergies mises en jeu.



1.3. L'énergie moyenne stockée par un téléphone portable chargé à 100 % est de 20 Wh. Certaines applications gourmandes en énergie nécessitent une puissance de 2 W. Calculer la durée d'utilisation du portable dans ces conditions. Justifier.

1.4. Calculer l'énergie qu'une cellule solaire « Annabelle » est capable de stocker. Justifier.

2. Le document 2 propose un autre combustible fissile que l'uranium pour les centrales nucléaires.

2.1. L'uranium 238, l'uranium 235, l'uranium 233 sont des isotopes.

Définir le terme isotope.

2.2. Une suite de réactions nucléaires élémentaires permet de faire passer du thorium 232 à une forme fissile de l'uranium. La première de ces réactions correspond à l'équation de réaction ci-dessous.

$$^{232}_{90}\text{Th} + {}^{1}_{0}\text{n} \rightarrow {}^{A}_{Z}\text{Th}$$

$^{1}_{0}\text{n}$ est le symbole du neutron.

Déterminer les valeurs de A et de Z. Justifier.

2.3. Citer un des avantages majeurs que présente l'utilisation du thorium 232.

2.4. Indiquer si l'expression « futur nucléaire vert » est appropriée. Expliquer brièvement.

That's all Folks !

Correction des exercices de la séance 12

12.4 Les déchets radioactifs

a. On base le classement sur l'activité massique du déchet (premier critère) et sa dirée de vie (basée sur sa demi-vie ou période, deuxième critère).

b. L'uranium est un déchet à longue vie (période > 31 ans) et à faible activité (au dessus de 100 Bq/g mais en dessous de 10^5 Bq/g). Il est stocké en faible profondeur.

12.5 L'extraction du gaz de schiste

1. Le méthane est présent sous différentes formes dans la nature. Deux formes sont particulièrement détaillées dans le document :
— **libre**, dans des **gisements** de gaz naturel ;
— **piégé**, dans du **schiste**.

2. Il s'agit d'une source d'énergie **non renouvelable**. Ce « gaz naturel » est le résultat de mécanismes géologiques qui s'étendent sur des **millions** d'années, et on le consomme sur quelques **dizaines** d'années. Cette source d'énergie non renouvelable est de ce fait appelée « énergie fossile ».

3. En exploitant le « gaz de schiste », les États-Unis veulent réduire leur déficit commercial et leur **dépendance énergétique**.

Une conséquence indirecte de cette exploitation frénétique est l'accroissement de l'offre en gaz naturel sur le marché mondial, ce qui provoque une baisse du prix au mètre cube de gaz, et indirectement celui du baril du pétrole. Ainsi, c'est la totalité de la facture énergétique qui s'en trouve réduite, ce qui est économiquement très avantageux pour les États-Unis, mais aussi pour tous les autres pays à forte dépendance énergétique, dont la France.

4. Les inconvénients de cette exploitation du gaz de schiste sont multiples.

Les explosions **fragilisent le sous-sol** et peuvent même induire une activité sismique ;

Les nappes phréatiques sont **polluées par les infiltrations** de méthane et de produits chimiques de fracturation, soit en provenance des bassins de stockage, soit par infiltration depuis la formation schisteuse.

5. Le gaz de schiste est le **méthane** CH_4, qui d'après le document 2 a une **capacité d'absorption** du rayonnement infrarouge 1000 fois plus élevée que le dioxyde de carbone CO_2. Cette absorption du rayonnement infrarouge est la cause de l'effet de serre, et donc de son augmentation, ce qui est appelé « réchauffement climatique ». Or le document 3 indique qu'environ **4 %** du gaz de schiste extrait s'échappe à cause des fuites !

De plus, les **96 %** de gaz restant sont (très certainement) destinés à être utilisés comme combustibles, lors d'une réaction chimique de combustion avec le dioxygène O_2 de l'air, tenant lieu de comburant :

$$CH_4 \ + \ 2\,O_2 \longrightarrow CO_2 \ + \ 2\,H_2O$$

Cette combustion conduit à la **formation** d'une molécule de **dioxyde de carbone** CO_2, gaz à effet de serre.

En conclusion, le gaz de schiste provoque l'émission massive de gaz à effet de serre, autant lors de son extraction que lors de son utilisation.

Grille

- ❑ Libre (gisements) + piégé (schiste)
- ❑ Non renouvelable, durée formation / consommation
- ❑ Réduire la dépendance énergétique
- ❑ Sols fragilisés, eaux polluées
- ❑ Gaz de schiste = méthane donc $\times 1000$ CO_2
- ❑ $CH_4 + 2\,O_2 \to CO_2 + 2\,H_2O$ donc formation CO_2

Note **.../6**

12.6 La cellule solaire « Annabelle »

1.1. Renouvelable ; durée de consommation égale (ou inférieure) à la durée de production.

1.2. Voir ci-dessus.

1.3. Durée t de fonctionnement :

$$\mathcal{P} = \frac{E}{t} \quad \Leftrightarrow \quad t = \frac{E}{\mathcal{P}}$$

$E = 20$ Wh énergie stockée ;
$\mathcal{P} = 2$ W puissance consommée par l'application ;

$$\Rightarrow \quad t = \frac{20}{2} = 10 \text{ h}$$

1.4. Le texte indique que la cellule « Annabelle » peut recharger deux fois un portable. L'énergie qu'elle peut stocker est donc double de celle stockée dans la batterie du portable :

$$E = 2 \times 20 = 40 \text{ Wh}$$

2.1. Isotopes : même nombre de proton Z, nombre de neutrons $N = A - Z$ (et donc de nucléons A) différents. Version plus ou moins « lourde » d'un même élément.

2.2.

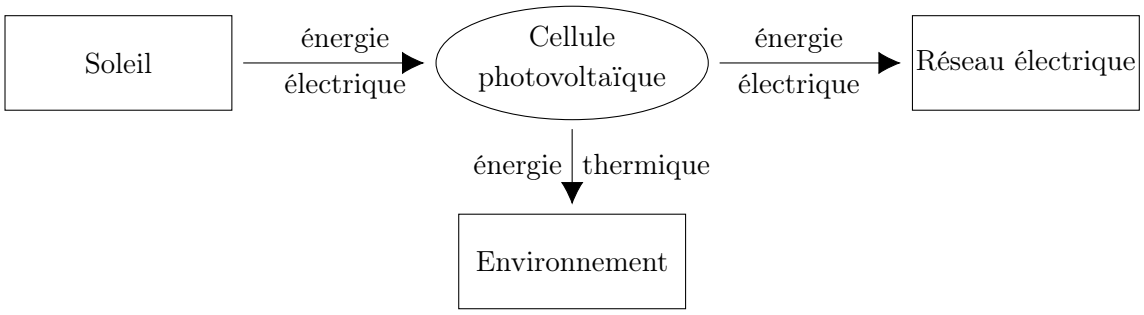
$$\begin{cases} 232 + 1 = A \\ 90 + 0 = Z \end{cases} \quad \Leftrightarrow \quad \begin{cases} A = 233 \\ Z = 90 \end{cases}$$

$$^{232}_{90}\text{Th} \ + \ ^{1}_{0}\text{n} \ \to \ ^{233}_{90}\text{Th}$$

2.3. • Plus abondant que l'uranium 235 fissile ;
• Moins de déchets à longue vie.

2.4. Avec moins de déchets à longue vie, le bilan du point de vue des déchets radioactifs est meilleur. De plus, on conserve l'avantage du nucléaire, c'est-à-dire par d'émission de dioxyde de carbone CO_2, gaz à effet de serre.

Grille

- ❑ Renouvelable + définition
- ❑ Énergies lumineuse, thermique, électrique
- ❑ $t = E/\mathcal{P} = 10$ h
- ❑ $E = 40$ Wh
- ❑ Définition isotope + $Z = 90$ et $A = 233$ justifié
- ❑ Plus abondant + moins de déchets à longue vie

Note **.../6**