

1 Quelles sont les réactions nucléaires au sein du Soleil ?

Principe général Les réactions de fusion nucléaire sont typiques du fonctionnement d'une 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 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).

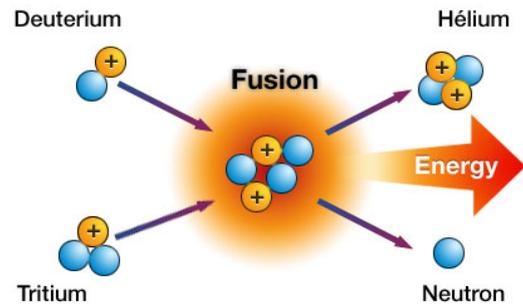


FIG. 1 – Fusion d'un deutérium et d'un tritium.

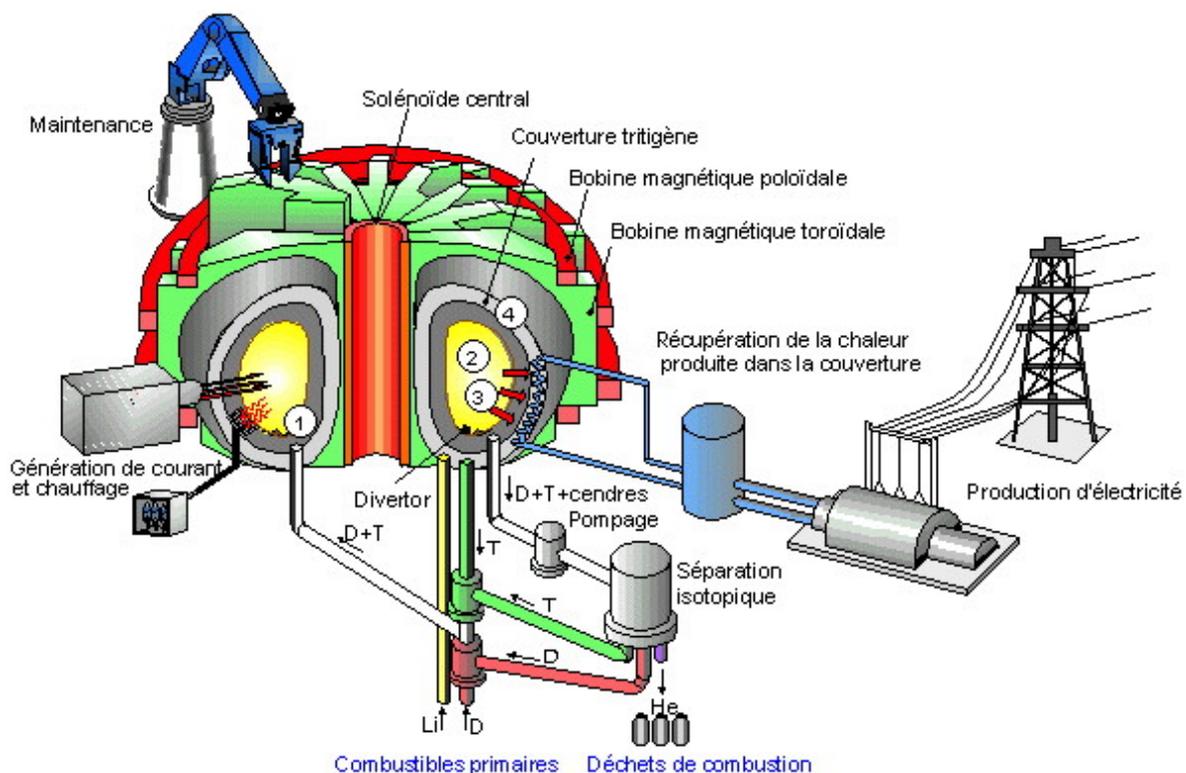


FIG. 2 – Schéma de principe du réacteur expérimental de fusion ITER.

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

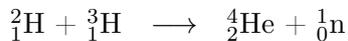
grés dans des machines toriques appelées Tokamak. Le mélange de deutérium et de tritium y est confiné à l'intérieur de parois immatérielles créées par des champs magnétiques intenses.

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 :



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.

.....



FIG. 3 – Un moment historique : la pause de la dernière tuile thermique dans ITER, par trois types en pyjamas.

2 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 transforma-

tion est une réaction nucléaire que l'on appelle réaction de et on dit que l'uranium 235 est

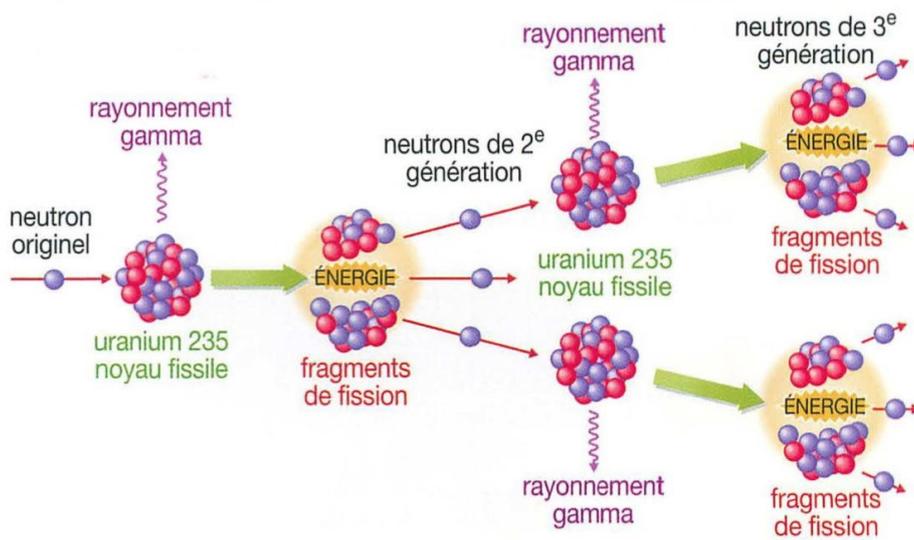


FIG. 4 – Réaction en chaîne pour l'uranium 235

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

combustion de 33 millions d'atomes de carbone.

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

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 (chaleur).

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

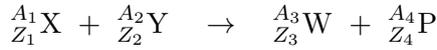
Le problème de rayons gamma À chaque modification d'un noyau, un rayonnement γ (lettre grecque « gamma ») est émis. Il s'agit d'un rayonnement pénétrant et très ionisant, c'est-à-dire qu'il va rompre des liaisons et faire apparaître des ions au sein de la matière qu'il traverse, y inclus la matière organique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

l'ADN codant l'information génétique!

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 :



X et Y sont les noyaux , W et P sont les noyaux

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

les produits).

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

Voici un exemple de réaction de fission :

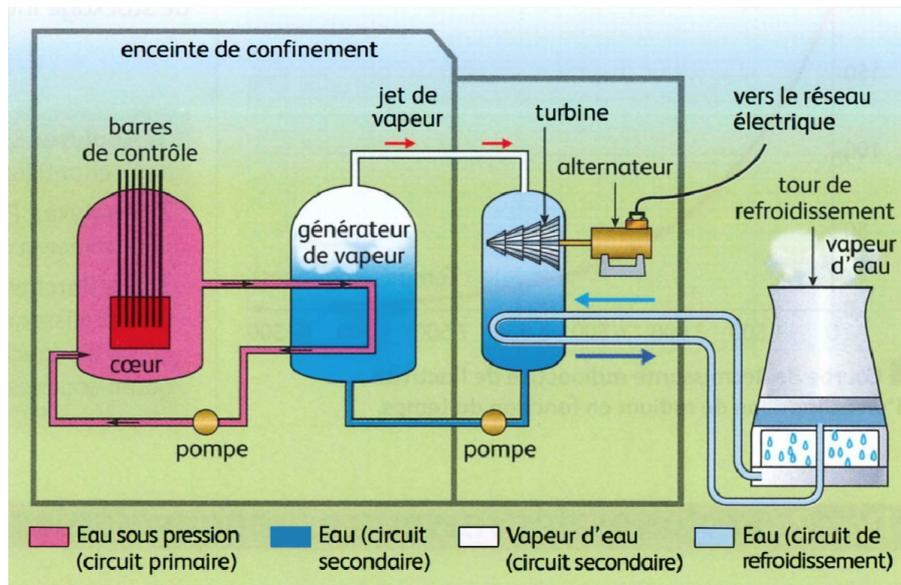


Pour écrire ces réactions, il peut être nécessaire de disposer d'un tableau périodique des éléments, afin de connaître le symbole des éléments (ils sont classés par numéro atomique Z croissant).

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

3 Quel est le principe d'une centrale nucléaire ?

Dans une centrale thermique à uranium, la transformation des noyaux des atomes au cœur du réacteur produit l'énergie.



3.1 Découvrons le fonctionnement

Dans une centrale thermique nucléaire, l'énergie thermique libérée par la des noyaux d'Uranium est transférée à de l'eau qui est vaporisée. La vapeur entraîne une turbine qui actionne un alternateur produisant de l'énergie

3.2 Analysons le fonctionnement

1. Quels points communs y a-t-il entre le fonctionnement d'une centrale thermique à combustible fossile et celui d'une centrale thermique à combustible nucléaire ?

2. Quelles sont les différences (entre une centrale nucléaire et une centrale « chimique ») ?

3. Quelles sont les formes d'énergie rencontrées dans ce type de centrale ?

Énergie libérée par la fission d'un gramme d'uranium 235 : 72,6 MJ.

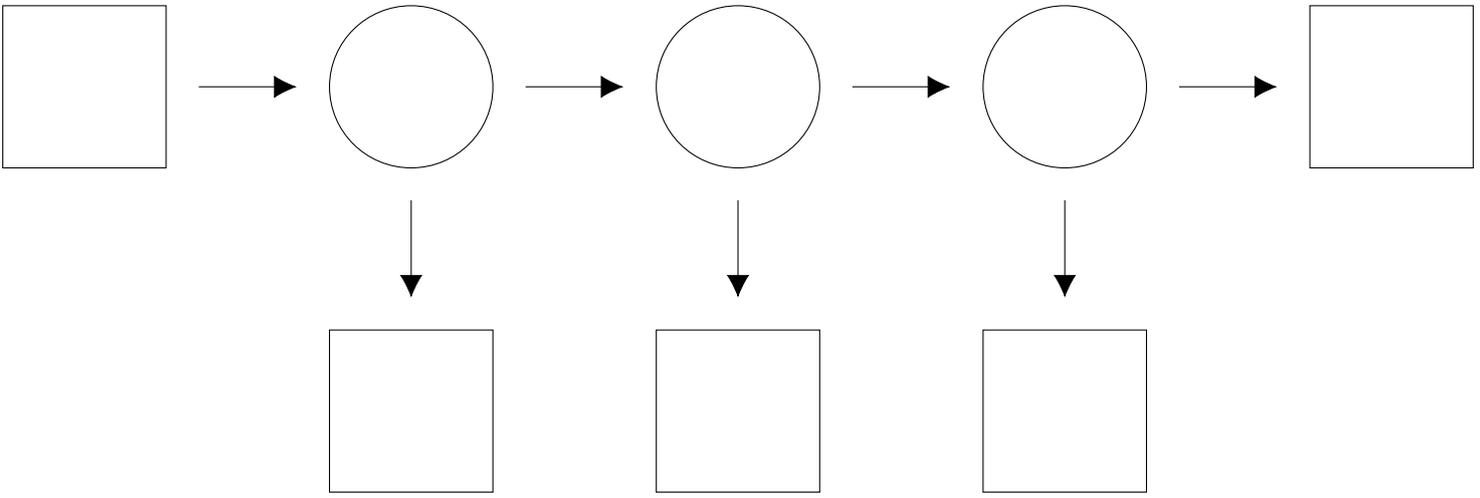


FIG. 5 – Chaîne énergétique d'une centrale nucléaire.

4 Quel est le problème avec les déchets radioactifs ?

4.1 Ils sont là pour longtemps !

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

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

Ces déchets sont pendant une durée qui peut être estimée à partir de la $t_{1/2}$ (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 :

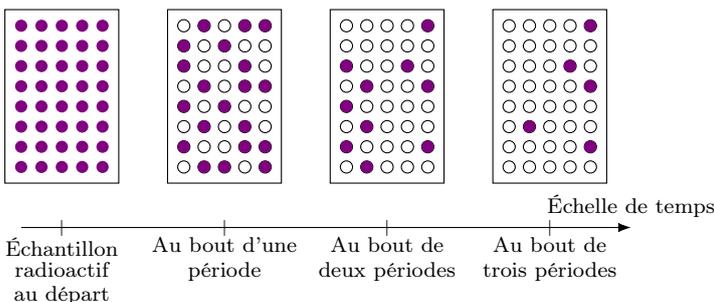


FIG. 6 – Illustration symbolique de la disparition des noyaux radioactifs. Admirez le travail d'orfèvre.

Voici quelques valeurs de - 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. 7 – Demi-vie de quelques isotopes instables.

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

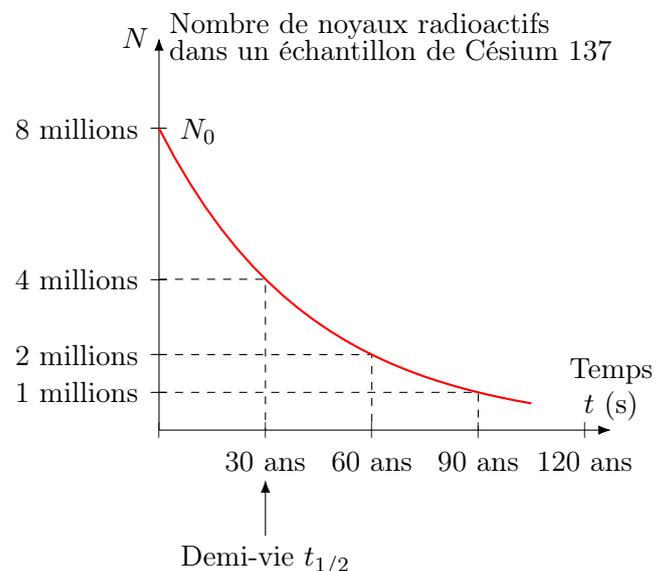


FIG. 8 – Décroissance radioactive du nombre de noyaux.

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

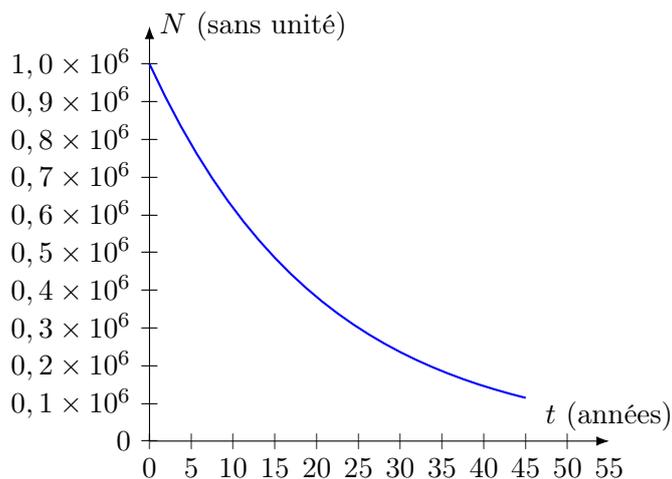


FIG. 9 – Décroissance radioactive du nombre de noyaux de plutonium 241 (Bac 2014).

4.2 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 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 et à forte activité ;

Les déchets à et à faible activité.

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

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

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ désintégration par seconde}$$

et se mesure avec un compteur Geiger.



FIG. 10 – 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. 11 – 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 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.

4.4 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 mise en œuvre par les Français dans les années 80 et abandonnée depuis consistait à utiliser

le plutonium militaire (utilisé dans les bombes) dans un surgénérateur. Les réserves sont suffisantes pour alimenter tous les réacteurs nucléaires pour dix siècles !

5 Correction des exercices (donnés lors de la séance n° 8)

8.1 N° 6 p. 179 – Étude d'une centrale thermoélectrique

1. Dans une centrale thermoélectrique, les ressources fossiles servent de combustible (1) pour vaporiser de l'eau (2). Cette vapeur met en mouvement une turbine reliée à un alter-



FIG. 12 – Chaîne énergétique d'une centrale thermoélectrique.

8.2 N° 4 p. 179 – Le nucléaire en France

1. L'énergie nucléaire n'est pas une énergie renouvelable, car le minerai d'uranium utilisé s'est formé au moment de la création de la Terre et existe en quantité limitée.
2. Des années 70 à 80, le thermique classique était la première source d'électricité en France, supplanté par le nucléaire à partir des années 80. Enfin, on assiste en 2009 à une très légère baisse de la production nucléaire.
3. Le nucléaire tient une part prépondérante dans la production électrique française (78 %), bien supérieure à ce qui se pratique dans le monde (où elle est devancée par exemple par l'hydroélectricité). Elle connaît un déclin dans le monde (elle est passée de 17 % à 13 % en 8 ans), mais une légère baisse de production en France à partir de 2009, comme l'indique le graphe. Le titre de l'article du Monde, s'il reflète la situation dans le monde, est discutable en ce qui concerne la situation française.
4. Avantages du nucléaire : indépendance énergétique vis-à-vis du pétrole, pas de dégagement de CO₂, donc pas d'impact sur l'effet de serre.

Inconvénients du nucléaire : ressource non renouvelable, déchets nucléaires à longue durée, risque d'accident grave.

Avantages de l'hydraulique : énergie renouvelable, aucune source de pollution.

Inconvénients de l'hydraulique : sa production dépend des réserves hydrauliques (en France, tous les sites importants pouvant donner lieu à l'installation de barrages sont exploités), accidents graves (rupture de barrage, quoique rare), impacts environnementaux négatifs lors de la création de lacs de retenue.

8.3 Science actualité p. 180 – À quoi sert le pétrole ?

1. Le pétrole n'est pas uniquement utilisé comme combustible fossile dans les transports, les centrales thermoélectriques

nateur (3). La vapeur est ensuite mise en contact avec un circuit de refroidissement pour la faire se condenser (4).

2. Différentes formes d'énergies utilisées : chimique (ressource fossile), thermique, mécanique et électrique.
3. La chaîne énergétique de la centrale est représentée ci-dessous.

ou dans le chauffage des habitations. Il est aussi à la base de la production d'objets et de médicaments.

2. On est mal.

8.4 N° 2 p. 182 – Scénarios énergétiques

1. 300 TWh vaut 300×10^9 kWh, c'est-à-dire :
 - d. une énergie de $1,08 \times 10^{15}$ J.
2. a. hydrocarbures : C. ressource fossile. D. gaz à effet de serre.
b. nucléaire : A. ressource fissile. E. déchets radioactifs.
c. hydraulique : B. ressource renouvelable.
3. En 2050 :
 - b. Le parc nucléaire ne serait pas renouvelé dans le scénario 1.
 - c. La consommation en énergies fossiles et renouvelables augmenterait dans les deux scénarios.
4. Avantages et inconvénients des deux scénarios :
 - Scénarios 1 et 2 : disparition du parc nucléaire existant (diminution des risques d'accident nucléaires).
 - Scénarios 1 : pas de nouveau parc nucléaire (donc pas de création de déchets nucléaires), et scénario 2 : création d'un nouveau parc nucléaire (production de déchets nucléaires).
 - Scénarios 1 et 2 : augmentation du recours aux ressources renouvelables et fossiles.
 - Scénarios 1 : diminution de la production électrique (grâce à une réduction de la consommation, via des économies d'énergie et une meilleure efficacité énergétique), et scénario 2 : augmentation de la production électrique.
 - Scénario 1 : division par 4 des émissions de gaz à effet de serre, scénario 2 : poursuite de la progression de la consommation d'énergie, donc des émissions de gaz à effet de serre.

6 Exercices (pour la séance n°10)

9.1 N° 1 p. 178

9.2 N° 2 p. 178

9.3 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 7.

On s'intéresse aux activités massiques de quelques éléments présents dans les déchets d'une centrale nucléaire, tableau 2 page 7.

- 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.

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

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.