

# LES ENERGIES NUCLEAIRES

# Petit historique

- Les sources d'énergies nucléaires, contrairement aux sources d'énergies fossiles, ne sont pas connues depuis la nuit des temps. Bien au contraire, ce n'est que très récemment par rapport à l'âge de l'humanité que les physiciens ont découvert leur existence.
- Tout à commencé à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, en 1896 précisément, lorsque Henri Becquerel (1852-1908) découvrit que qu'un minerai, appelé *pechblende*, émettait spontanément un rayonnement invisible pouvant traverser la matière et impressionner une plaque photographique placée derrière une plaque métallique. Il venait de découvrir ce qui allait être appelé rapidement la **radioactivité**.
- À la suite de cette découverte, Pierre et Marie Curie ont découvert plusieurs autres substances radioactives telles que la polonium ou le radium.
- L'énergie nucléaire est l'énergie de liaison des constituants du noyau des atomes. Ce noyau est un assemblage de protons, de charge positive, et de neutrons sans charge très fortement liés malgré la répulsion électrique entre protons. Le noyau est extrêmement compact ( $10^{-12}$  mm), 100 000 fois plus petit que l'atome lui-même.
- Dans les atomes lourds le noyau contient beaucoup de protons qui se repoussent. Certains de ces noyaux (par exemple d'uranium ou de thorium) peuvent devenir instables et se rompre en libérant une partie de leur énergie de liaison. C'est la fission de l'atome. Dans les atomes très légers, au contraire, deux noyaux peuvent se fondre pour former un atome plus lourd mais plus stable en dégageant une énergie considérable. C'est la fusion, par exemple de noyaux d'hydrogène en noyaux d'hélium.

## **Qu'est-ce que l'uranium**

L'uranium est une source d'énergie construite d'atomes. L'atome est constitué d'une région centrale, le noyau atomique, autour de laquelle se déplacent les électrons soumis à l'action des forces électromagnétiques. Le noyau a une dimension 10 000 fois plus faible que celle de l'atome.

## **La production d'uranium**

Après son extraction du sol, le minerai d'uranium est transformé pastille d'oxyde d'uranium. Ce combustible provoque des réactions nucléaires mais il ne brûle pas. Chaque pastille ne pèse que sept grammes et vaut pourtant une tonne de charbon. Dans chaque réacteur d'une centrale, il y a plus de treize millions de ces pastilles, qui permettent le fonctionnement du réacteur pendant trois ans.

Les pays les plus producteurs en 1997 sont :

Canada : 11 908 tonnes

Australie : 5 520 tonnes

Niger : 3 497 tonnes

Namibie : 2 887 tonnes

Etats-Unis d'Amérique : 2 170 tonnes

Russie : 2 000 tonnes

# La fission nucléaire

La fission apparaît lorsque le noyau d'un atome lourd (noyau qui contient beaucoup de nucléons et qui est dit fissile) est fractionné en plusieurs éléments beaucoup moins lourds, la plupart du temps deux particules.

Cette réaction dite nucléaire est traduite par le dégagement de neutrons (donc le nombre varie) et un dégagement d'énergie d'une forte intensité, de l'ordre du MeV (à comparer aux réactions chimiques qui sont de l'ordre du eV).

→ Il existe 2 types de fission, la fission spontanée et la fission induite.

- On parle de fission nucléaire naturelle lorsque le noyau se désintègre en plusieurs autres morceaux sans qu'il est préalablement absorbé une particule (comme un neutron). Cette fission n'est possible que pour des noyaux extrêmement lourds, car l'énergie de liaison par nucléon est alors plus petite que pour les noyaux moyennement lourds nouvellement formés.
- La fission synthétique a lieu lorsqu'un noyau lourd intègre une particule (généralement un neutron) le noyau alors composé en plus de la particule se désintègre en plusieurs fragments. Sous l'effet de la collision avec un neutron, le noyau de certains gros atomes (dits fissiles) a la propriété de se casser en deux. Cette rupture s'accompagne en général de l'émission d'un ou de plusieurs neutrons rapides (2 ou 3). Ceux-ci réagissent avec les noyaux qu'ils rencontrent et sont soit diffusés, c'est-à-dire renvoyés dans une direction différente, soit absorbés. Il s'agit de la « réaction en chaîne » qui est maîtrisée grâce à la mise en place de barres de contrôles absorbants ainsi les neutrons supplémentaires. Ce système permet de maintenir un taux de fission constant.
- Au niveau du combustible, les principaux atomes fissiles sont l'uranium 233, l'uranium 235, le plutonium 239 et le plutonium 241. Seul l'uranium 235 se trouve à l'état naturel (plutonium : de temps en temps le noyau ne se brise pas au contact d'un neutron et le neutron s'ajoute au noyau, il y a formation de plutonium).
- Le combustible le plus utilisé dans les centrales nucléaires de type fission est donc l'uranium 235 qui est transformé en oxyde d'uranium et qui est réduit sous la forme de pastille d'environ un centimètre de hauteur sur un centimètre de diamètre. Ces pastilles sont insérées dans le cœur du réacteur et permet la réaction nucléaire. Le chargement d'un réacteur nucléaire de 900 mégawatts (millions de watts) nécessite en tout 11 millions de pastilles.

## Avantages

- C'est la forme d'énergie exploitable la plus concentrée. À partir de peu d'uranium, on peut extraire beaucoup d'énergie.
- La fission nucléaire n'engendre pas d'émission de gaz à effet de serre.

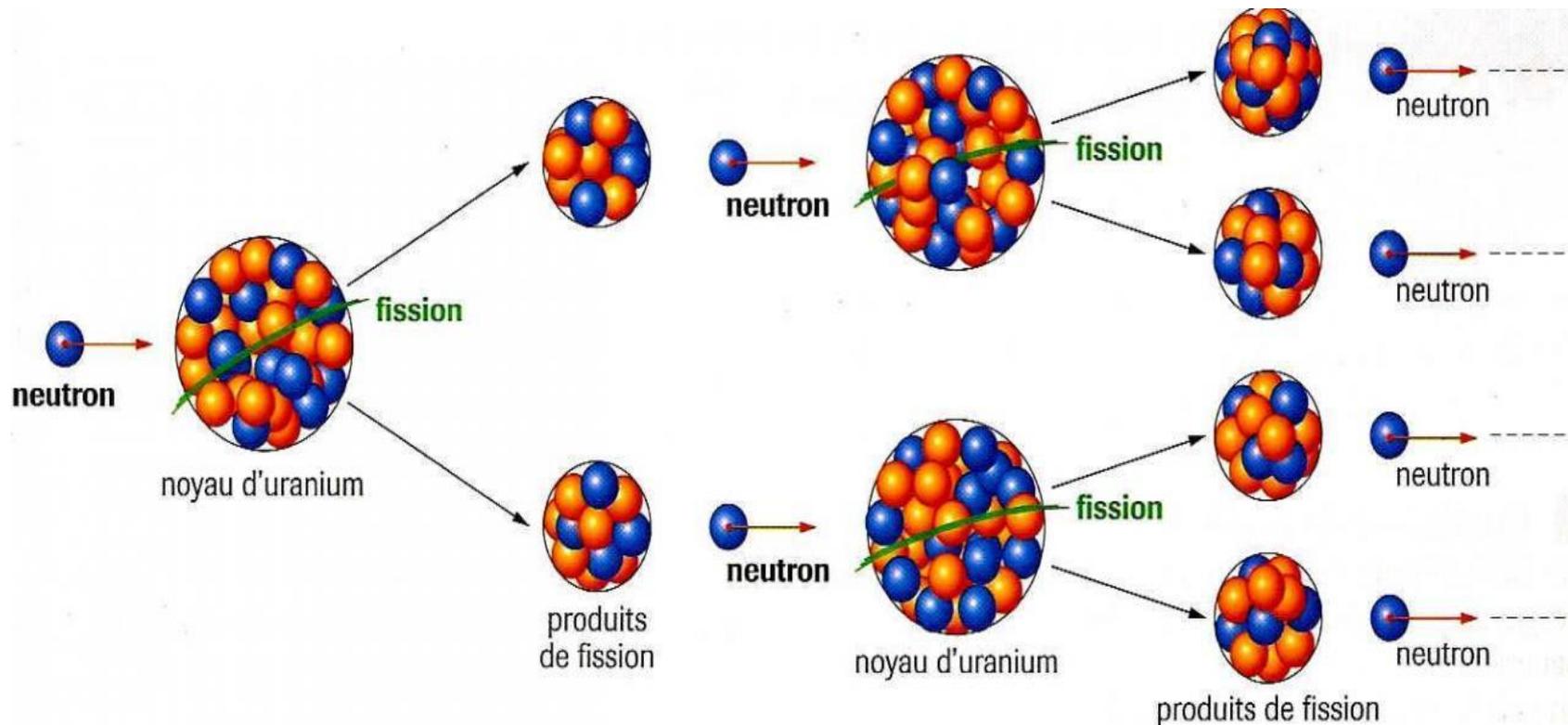
## Inconvénients

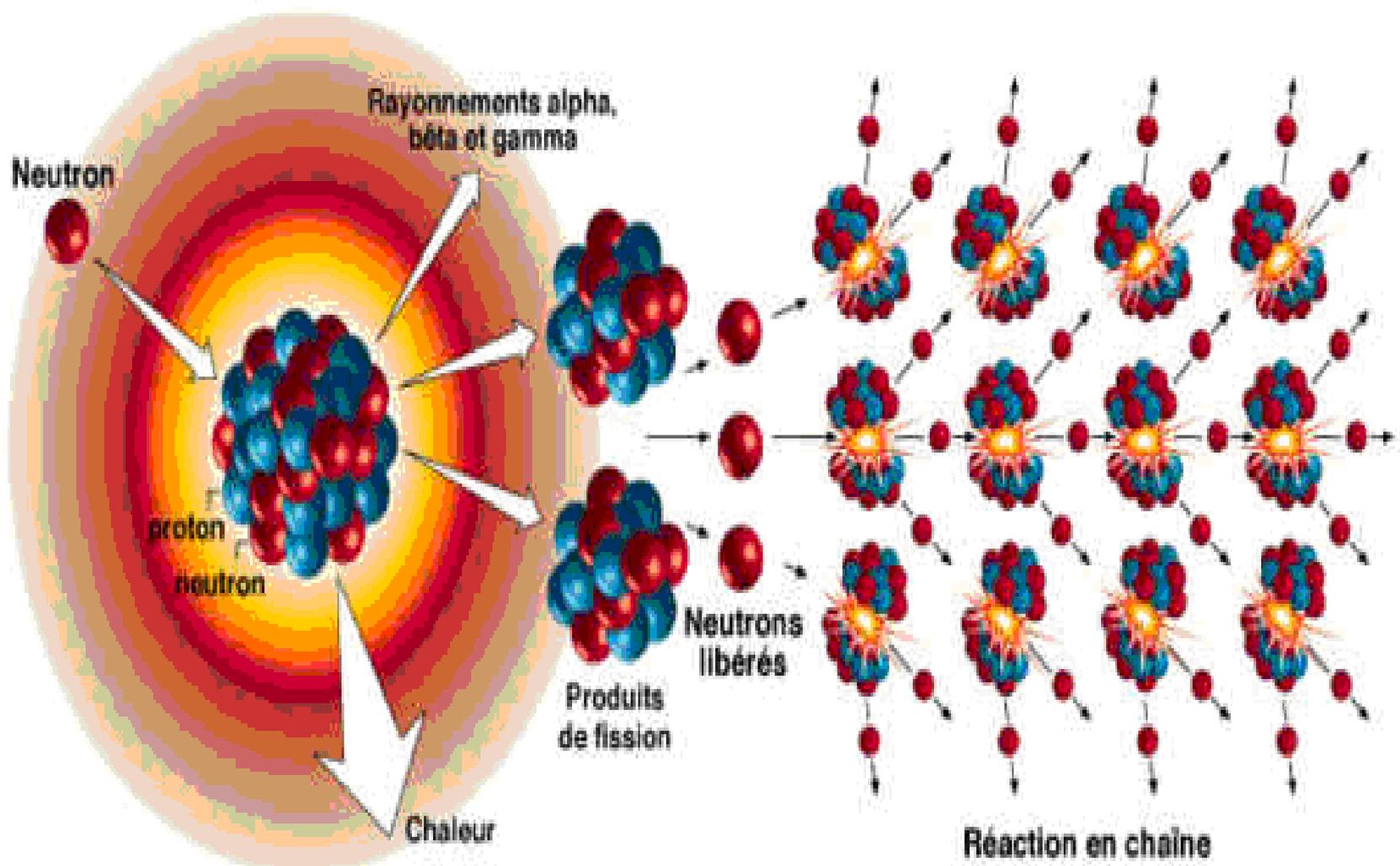
- Les gisements d'uranium sont peu nombreux et donc très recherchés.
- Une partie des déchets produits (plutonium) sont nécessaires à la production des bombes atomiques. C'est ce que l'on appelle la **prolifération nucléaire**. C'est pourquoi combustible et déchets doivent être étroitement surveillés.
- Les installations nucléaires présentent des risques d'emballement qui peuvent amener des conséquences extrêmement graves en cas d'explosion (dispersion de matière radioactive dans l'environnement, pollution irréversible des sols qui deviennent impropres à l'agriculture et à la vie humaine). Elles nécessitent une surveillance extrême. L'accident de la centrale de Tchernobyl de 1986 est dans toutes les mémoires. Certaines catastrophes naturelles peuvent entraîner la destruction partielle ou totale d'un réacteur nucléaire, comme ce fut le cas à Fukushima au Japon en 2011. Et la liste des accidents nucléaires est déjà bien longue.
- Le rendement de la transformation de la chaleur libérée par la matière radioactive en énergie électrique ne dépasse pas 33 % environ, ce qui signifie qu'une grande partie de l'énergie libérée est définitivement gaspillée.
- La radioactivité se "transmet" d'un matériau radioactif à un autre qui ne l'est pas initialement. C'est le phénomène d'activation. Ainsi, si au départ, seul le combustible de la centrale est radioactif, à la fin de la vie de la centrale, une grande partie de ses éléments (murs, canalisations, etc.) est devenue radioactive.
- Les déchets produits par l'industrie de l'uranium et les centrales nucléaires forment la majeure partie des déchets radioactifs terrestres. Ces déchets sont radioactifs et par conséquent dangereux pour les êtres vivants qui peuvent se trouver en contact ou à proximité d'eux. Une très grande partie de ces déchets est faiblement radioactive (donc pas trop dangereuse) et une très petite partie de ces déchets est extrêmement radioactive (donc extrêmement dangereuse). Ces déchets perdent peu à peu leur radioactivité mais très lentement. Ils sont donc nocifs et impossibles à recycler ce qui pose un problème majeur de gestion (Où faut-il les mettre ? Comment éviter qu'ils ne se dispersent dans l'environnement ?).

## Utilisation

L'énergie de fission nucléaire est utilisée pour produire de l'électricité dans des centrales nucléaires, installations imposantes très massives. Ce mode de production, très centralisé peut alimenter une région à elle seule. La puissance électrique de ces installations peut varier entre 900 et jusqu'à 1450 MWe (*e* pour électrique), mais il faut savoir qu'en général, plusieurs centrales nucléaires sont regroupées sur un même site (jusqu'à six en France, à Gravelines).

L'énergie de fission nucléaire est utilisée à des fins militaires : ce sont les fameuses bombes atomiques. Elle sert aussi à propulser des navires et sous-marins de guerre.





# La fusion thermonucléaire

- La fusion thermonucléaire correspond à un autre type de réaction nucléaire : celle où deux noyaux atomiques se **collent** pour ne former plus qu'un seul noyau. Il s'agit de la réaction inverse de la réaction de fission. Celle-ci ne produit de l'énergie que si les noyaux initiaux sont très petits, ceux de l'hydrogène par exemple.
- Il s'agit de l'énergie primaire la plus utile à l'humanité puisque ce sont les réactions de fusion thermonucléaire qui sont à l'origine de la chaleur et de la lumière émises par... le soleil, et plus généralement par toutes les étoiles. Grâce à elles, le soleil brille et apporte l'énergie nécessaire à la vie à la surface de la Terre. Au cœur des étoiles, ces réactions produisent les métaux et éléments qui forment l'ensemble de la matière présente dans l'Univers. Bref, cette réaction est à l'origine de tout.

## Avantages

- L'un des combustibles, le deutérium, est très abondant, puisqu'on le trouve dans l'eau de mer.
- La fusion thermonucléaire n'engendre pas d'émission de gaz à effet de serre.
- La fusion thermonucléaire ne devrait pas entraîner de risque d'explosion des réacteurs.

## Inconvénients

- L'autre combustible, le tritium, n'existe quasiment pas dans la nature. Il faudrait le produire à l'aide d'une autre réaction nucléaire à partir de lithium, un matériaux difficile à produire.
- Si jamais une centrale est finalement opérationnelle un jour, elle devra être immense afin de maintenir plus facilement les conditions nécessaire à l'entretien de la réaction. C'est donc une énergie dont la production sera hypercentralisée.
- Les coûts de recherche puis de construction des centrales sont et seront colossaux.
- Comme pour toute réaction nucléaire, l'exploitation de ces centrales produira des déchets (forte dégradation des matériaux de la centrale notamment).
- Le rendement de la transformation de l'énergie nucléaire en énergie électrique ne dépassera pas non plus 33% en raison du passage inévitable de l'énergie sous forme de chaleur.

## Utilisation

- L'énergie de fusion thermonucléaire n'a encore jamais été exploitée à des fins civiles. Un projet international, du nom d'*ITER* a pour vocation la réalisation d'un réacteur de fusion thermonucléaire. Le site qui a été choisi est celui de Cadarache, en Provence (France). L'objectif est de vérifier qu'un tel réacteur peut fonctionner de manière durable. Il permettra de tester les matériaux afin de trouver les plus résistants. À long terme, ce projet pourrait déboucher sur la réalisation d'un réacteur de démonstration puis d'un prototype industriel de production d'énergie électrique... mais pas avant 50 ans.
- Par contre, l'énergie de fission thermonucléaire est utilisée à des fins militaires : ce sont les fameuses **bombes H (ou bombes à hydrogène)** et elles marchent très bien !

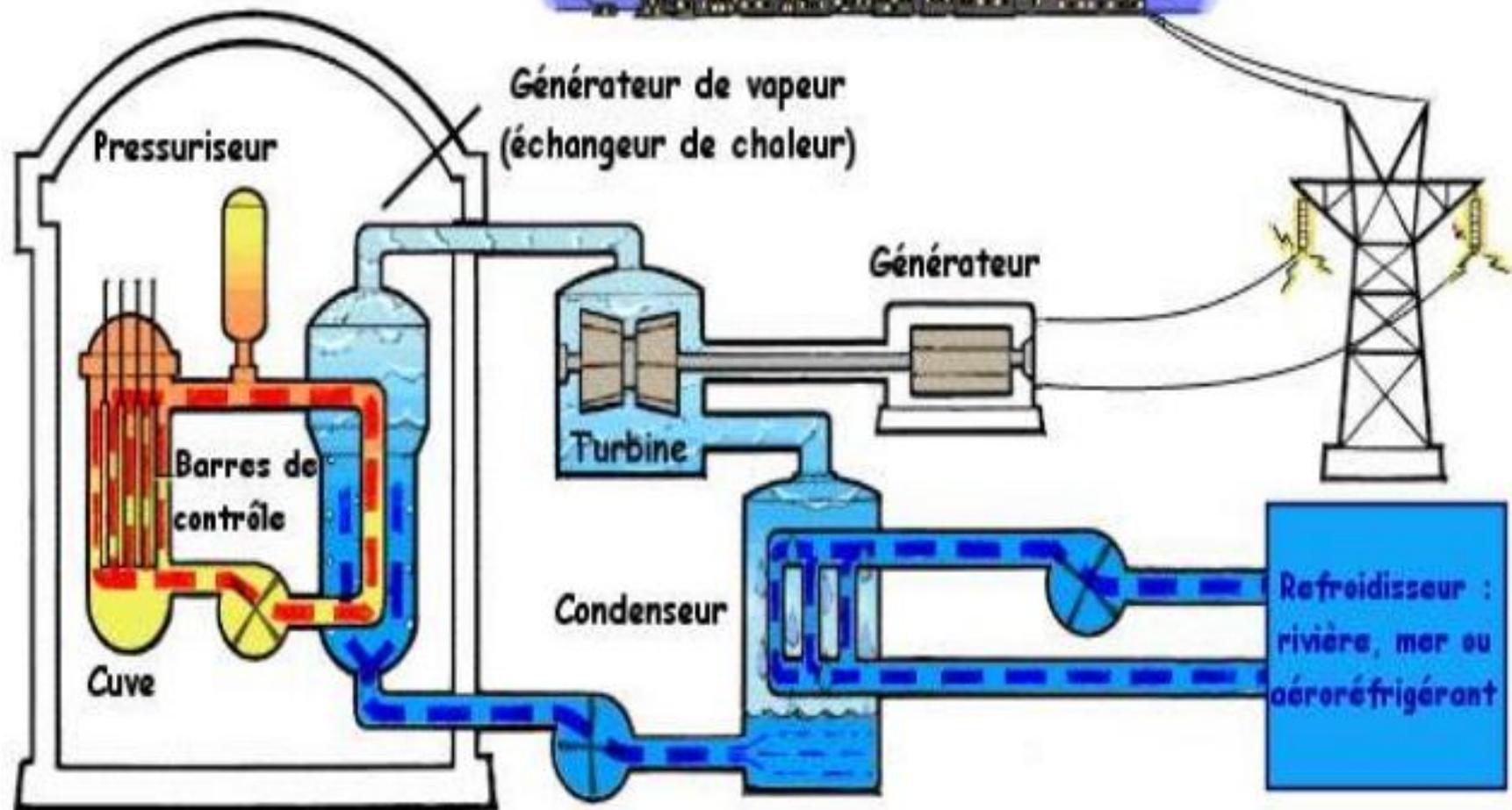
# L'utilisation de l'uranium

## La centrale nucléaire

Dans une centrale nucléaire, comme dans toutes les centrales thermiques, on produit de la vapeur d'eau sous pression pour faire tourner un ensemble de turbine-alternateur et obtenir ainsi du courant électrique. Mais la chaleur nécessaire pour faire bouillir l'eau est fournie par de l'uranium placé dans une solide cuve d'acier. L'ensemble constitue le réacteur nucléaire.

Quand elle fonctionne normalement, la centrale nucléaire ne rejette pratiquement aucune substance polluante. Par contre, les produits présents dans le cœur du réacteur sont extrêmement radioactifs, donc très dangereux, et ne doivent en aucun cas s'en échapper. C'est pourquoi cette centrale comporte deux circuits d'eau. Ainsi, l'eau circule dans le cœur (circuit primaire) ne sort pas du réacteur et fournit sa chaleur à l'eau de l'autre circuit (bleu) dans les générateurs de vapeur.

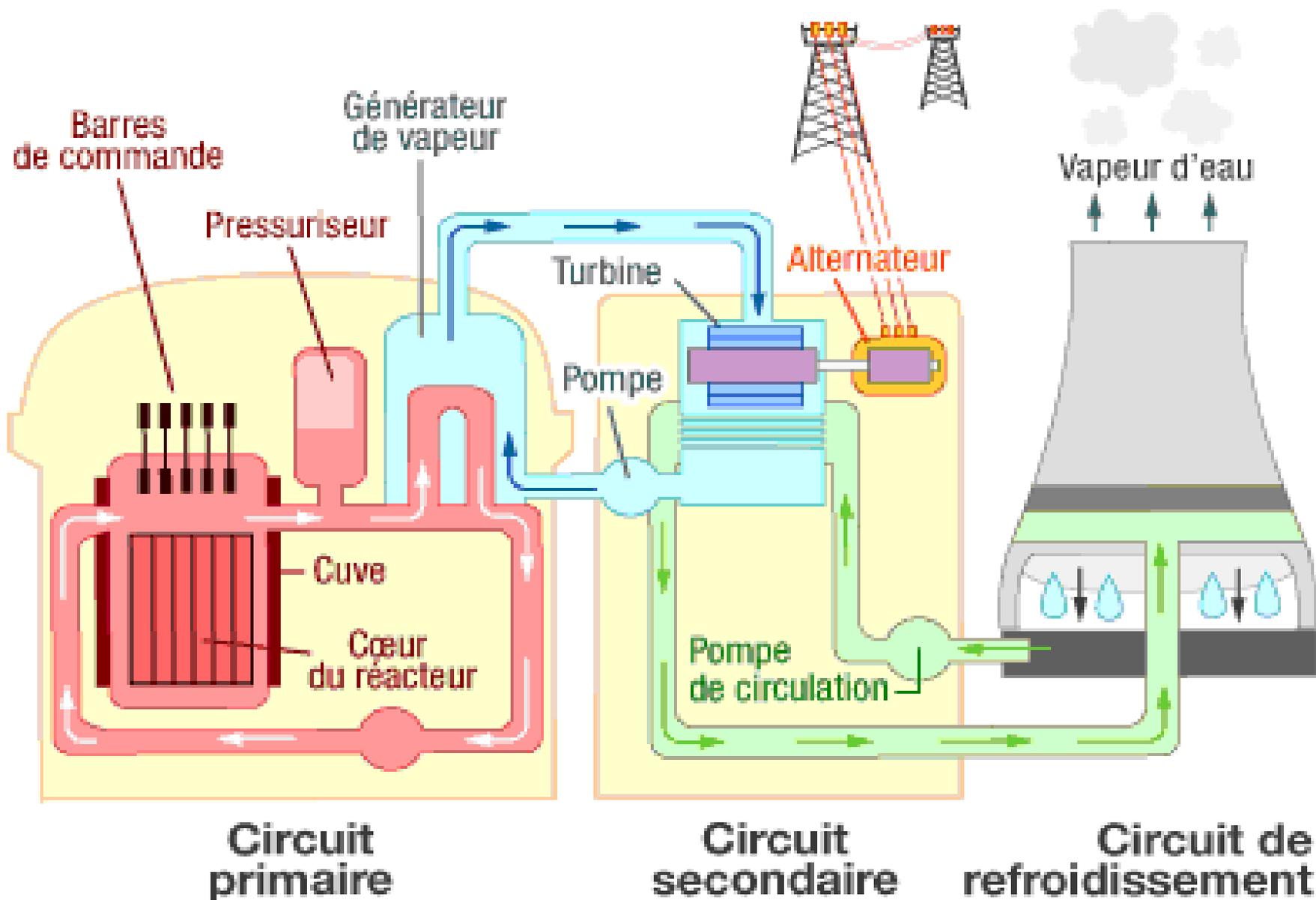
Réacteur nucléaire  
(enceinte de sécurité)



La fission dégage de l'énergie sous forme de chaleur. C'est cette énergie que l'on utilise pour produire de l'électricité. Le phénomène de fission dégage également des rayonnements alpha, bêta ou gamma et libère des neutrons qui viennent alimenter la réaction de fission et bombarder les nouveaux noyaux. C'est pourquoi on parle de réaction en chaîne. Au contact des milliers de crayons de combustible nucléaire, l'eau récupère la chaleur produite par la fission des atomes d'uranium. L'eau de la cuve s'échauffe à leur contact à plus de 300°C. Un pressuriseur maintient la pression à environ cent cinquante cinq bars, ce qui l'empêche de bouillir. Elle circule dans un circuit fermé. Le générateur de vapeur, la pompe, la cuve et le pressuriseur constituent le circuit primaire. Seul ce circuit contient de la radioactivité.

L'eau du circuit primaire transmet sa chaleur à l'eau circulant dans un autre circuit fermé : le circuit secondaire. L'échange de chaleur s'effectue dans un générateur de vapeur, un grand échangeur de chaleur cylindrique composé de milliers de tubes. La chaleur transforme l'eau du circuit secondaire en vapeur. Un alternateur, couplé à la turbine, convertit finalement l'énergie cinétique en électricité, laquelle alimente le réseau haute tension. Au contact de milliers de tubes dans lesquels circulent de l'eau froide, la vapeur se condense, redevient de l'eau liquide et est renvoyée vers le générateur de vapeur pour un nouveau cycle. La turbine, le condenseur, la pompe et le générateur de vapeur constituent le circuit secondaire de la centrale.

Pour que le système fonctionne en continu, il faut assurer son refroidissement. C'est pourquoi il y a un troisième circuit indépendant des deux autres qui est le circuit de refroidissement. Sa fonction est de condenser la vapeur sortant de la turbine. Pour cela est aménagé un condenseur, appareil formé de milliers de tubes dans lesquels circule de l'eau froide prélevée à une source extérieure : rivière ou mer. Au contact de ces tubes, la vapeur se condense pour se transformer en eau. Quant à l'eau du condenseur, elle est rejetée, légèrement échauffée, c'est-à-dire à environ trois degrés de plus que de la source d'où elle provient. Si le débit de la rivière est trop faible, ou si l'on veut limiter son échauffement, on utilise des tours de refroidissement appelées aéroréfrigérants. L'eau échauffée provenant du condenseur tombe sous forme de pluie (précipitation). Elle est récupérée au pied de l'aéroréfrigérant et entraînée par une pompe, l'essentiel de cette eau retourne vers le condenseur. Cette pluie est refroidie par un grand courant d'air (convection naturelle) par la forme particulièrement aspirante de l'aéroréfrigérant. Dans cette dernière, l'air en refroidissant la pluie se charge en humidité et se transforme en nuage de vapeur d'eau. 1,5 % de cette eau s'évapore dans l'atmosphère, ce qui provoque de grands panaches blancs que l'on voit sortir de la grande cheminée.



# Les réacteurs nucléaires

## Les différents types de réacteurs

Selon la nature du combustible, du modérateur et du réfrigérant utilisés, on distingue différents types de réacteur :

Les réacteurs graphite-gaz qui emploient de l'uranium naturel comme combustible, du graphite comme modérateur et du gaz carbonique sous pression comme caloporteur.

Les réacteurs à eau ordinaire utilisent de l'uranium enrichi à 3%. La réaction est modérée et refroidie à l'eau ordinaire.

Les réacteurs à eau lourde consomment de l'uranium naturel, emploient de l'eau lourde comme modérateur et celle-ci sous pression comme caloporteur.

Les réacteurs à haute température refroidis au gaz utilisent de l'uranium hautement enrichi, du graphite comme modérateur, de l'hélium comme caloporteur.

## La protection du réacteur

La protection des produits radioactifs est assurée par des barrières entre le combustible et l'extérieur de la centrale nucléaire.

La première barrière est constituée par les gaines qui contiennent les pastilles d'uranium. La deuxième barrière est constituée par l'enveloppe du circuit primaire (voir :la centrale nucléaire), renfermant un réfrigérant toujours contaminé. La troisième barrière est l'enceinte de confinement construite pour retenir les neutrons et les produits radioactifs.

Les réacteurs sont munis de sécurités qui leur imposent des limites très strictes. Si les seuils imposés ne sont pas respectés, des barres de sécurité arrêtent automatiquement la réaction.

# Les accidents nucléaires

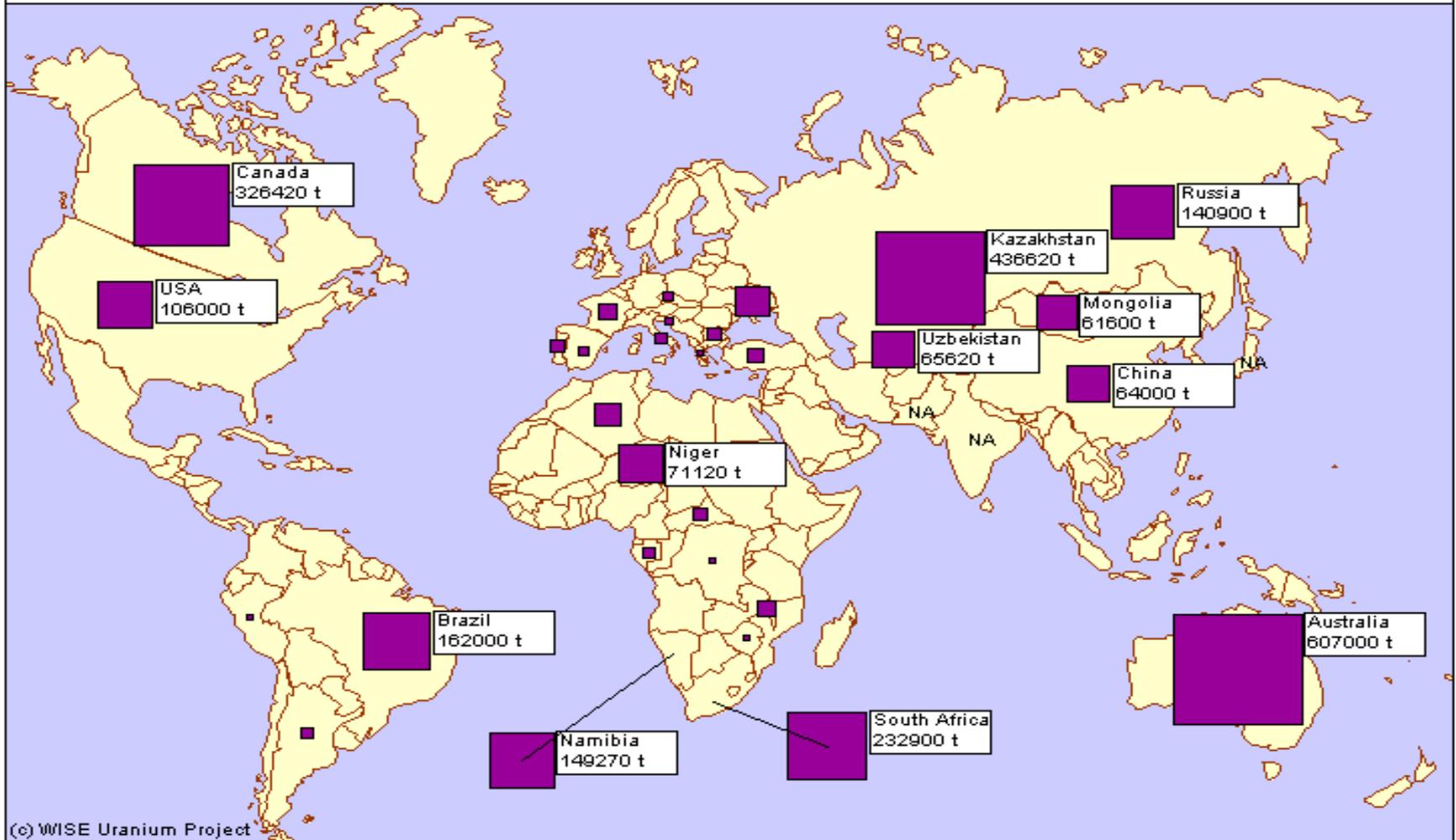
De nombreux incidents se produisent chaque année dans les centrales nucléaires, mais ils sont très rares. L'un d'eux survint le 18 mars 1979 dans la centrale à eau de Three Miles Island, en Pennsylvanie. La circulation du réfrigérant fut rétablie à temps et évita la fusion du combustible, qui aurait pu traverser la cuve du réacteur et s'enfoncer dans le sol.

L'accident le plus grave eut lieu le 26 Avril 1986, dans la centrale de Tchernobyl, en Ukraine. Cette centrale emploie de l'uranium enrichi, du graphite comme modérateur et de l'eau ordinaire bouillante comme réfrigérant. L'accident a été favorisé par le fait que les réacteurs de ce type sont instables. Par suite d'une série d'erreurs humaines, une explosion se produisit, détruisant une partie du réacteur et provoquant un incendie. La gravité de l'accident tient surtout sur le fait que le réacteur fonctionnait sans enceinte de confinement (voir la centrale nucléaire). L'incendie libéra à peu près 5000 fois plus de radioactivité que ce que rejette en un an une centrale en ordre de marche. Un nuage radioactif s'étendit sur toute l'Europe et fit plusieurs fois le tour de la terre. Plus de 600 000 personnes furent plus ou moins contaminées en Ukraine. Douze ans après, la chape de béton abritant le réacteur menaçait de s'effondrer, faute de travaux.

# Ressources mondiales En Uranium

## World Uranium Resources

[t U] Reasonably Assured Resources as of 1/1/1999, Cost range US\$80/kg U or less (OECD 2000)

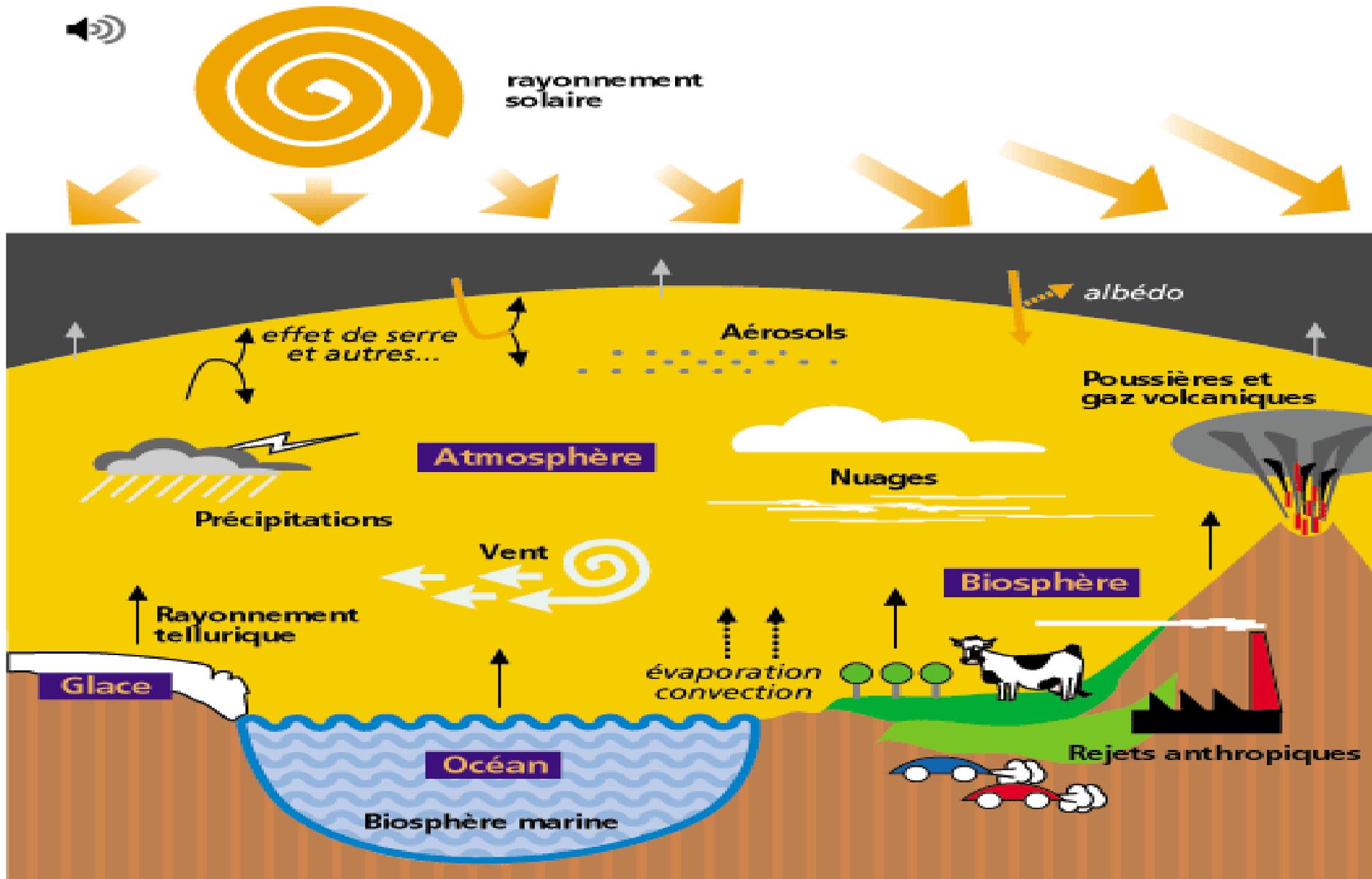


Les scientifiques s'accordent aujourd'hui pour affirmer la prépondérance du rôle des activités humaines dans le changement climatique et pour voir dans l'effet de serre le principal mécanisme conduisant au réchauffement de la planète.

### **Qu'est-ce que l'effet de serre ?**

- « La température moyenne de notre planète résulte de l'équilibre entre le flux de rayonnement qui lui parvient du soleil et le flux de rayonnement infrarouge renvoyé vers l'espace.
- La répartition de la température au niveau du sol dépend de la quantité de gaz à effet de serre (GES) présents dans l'atmosphère. Sans eux, la température moyenne serait de - 18°C et la terre serait inhabitable. Leur présence amène cette température à 15°C.
- Les gaz responsables de l'effet de serre d'origine anthropique sont le gaz carbonique (CO<sub>2</sub>), le méthane (CH<sub>4</sub>), l'oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O), l'ozone troposphérique (O<sub>3</sub>), les CFC et les HCFC, gaz de synthèse responsables de l'attaque de la couche d'ozone, ainsi que les substituts des CFC : HFC, PFC et SF<sub>6</sub>.
- Les gaz à effet de serre sont naturellement très peu abondants. Mais du fait de l'activité humaine, la concentration de ces gaz dans l'atmosphère s'est sensiblement modifiée : ainsi, la concentration en CO<sub>2</sub>, principal GES, a augmenté de 30% depuis l'ère préindustrielle.
- Les effets combinés de tous les GES équivalent aujourd'hui à une augmentation de 50% de CO<sub>2</sub> depuis cette période. »

# Rayonnement solaire et effet de serre



## Quelles sont les principales sources de gaz à effet de serre ?

- « Lorsque nous utilisons des énergies fossiles, telles que le charbon, le pétrole ou le gaz, nous brûlons du carbone, ajoutant ainsi du CO<sub>2</sub> à l'air : environ 20 milliards de tonnes par an dans le monde. Les océans et les forêts et, dans une bien moindre mesure, les autres plantes, éliminent à peu près la moitié de cet excédent de gaz carbonique. Cependant, sa concentration ne cesse de croître : de l'ordre de 0,028 % il y a cent cinquante ans, elle est aujourd'hui de 0,036 %.
- Un autre gaz à effet de serre est le méthane (CH<sub>4</sub>), dont la concentration a doublé depuis la révolution industrielle. Les sources "humaines" sont les rizières, les décharges d'ordures, les élevages bovins, les fuites sur les réseaux de gaz et l'exploitation charbonnière. L'oxyde nitreux, ou protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) est un autre gaz à effet de serre, qui provient de certaines industries et des excès d'épandages d'engrais.
- Il faut compter également avec l'ozone de la basse atmosphère, qui se forme à la suite des émissions de monoxyde de carbone (CO), d'oxydes d'azote (N<sub>2</sub>O) et de composés organiques volatils (COV). Il y a enfin les gaz fluorés : CFC, HCFC, HFC, PFC et HF6. »
- Les deux principaux gaz à effet de serre sont le gaz carbonique, qui contribue à l'effet de serre à une hauteur de 60 % et le méthane. Cependant, tandis que méthane n'a qu'une faible durée de vie dans l'atmosphère, le gaz carbonique y demeure pendant plus d'un siècle.
- C'est pourquoi l'attention se focalise aujourd'hui sur la réduction des émissions de gaz carbonique.

# Protocole de Kyoto

- Le protocole de Kyoto, qui fixe des objectifs de réduction de gaz à effet de serre à une quarantaine de pays industrialisés, fait suite à la Convention sur le climat de 1992. Ouvert aux Etats parties à la Convention, il a été ratifié par 190 pays [octobre 2010]. Il ne comporte toutefois d'engagement que pour 38 pays industrialisés, avec un objectif de réduction moyenne de 5,2 % par rapport aux émissions de 1992 des émissions de six gaz à effet de serre entre 2008 et 2012.
- Le protocole de Kyoto expirant fin 2012, une nouvelle négociation s'est ouverte à Bali en 2007 dans le but de conclure un accord international sur l'après-Kyoto. Une étape a été marquée, en décembre 2011, lors de la conférence de Durban, en Afrique du Sud, vers la conclusion en 2015 d'un nouveau pacte mondial sur le climat. La feuille de route de Durban prévoit également la possibilité d'une prolongation du protocole de Kyoto, pour une deuxième période dont la durée (5 ou 8 ans) doit encore être débattue.

## L'entrée en vigueur du protocole de Kyoto (2005)

- Le succès de la négociation de Bonn finalisée à Marrakech en novembre 2001 a permis la ratification du protocole par de nombreux pays en 2002 : l'Union européenne et ses 15 Etats membres le 31 mai 2002 , le Japon le 4 juin. Enfin, la ratification du Protocole par la Russie le 22 octobre 2004 a ouvert la voie à **l'entrée en vigueur du protocole de Kyoto le 16 février 2005**. Il devait, en effet, pour entrer en vigueur, être ratifié par au moins 55 pays représentant 55 % des émissions de CO<sub>2</sub>. Les pays en développement, y compris le Brésil, la Chine, l'Inde et l'Indonésie, sont également Parties au protocole mais ne sont pas concernés par la réduction d'émissions. Les Etats-Unis n'ont pas ratifié le protocole de Kyoto. Signé sous la présidence Clinton en 1997, celui-ci n'a pas été ratifié par le Sénat américain. Et le 13 mars 2001, le Président George W. Bush a dénoncé le protocole, annonçant qu'il privilégiait de nouvelles approches pour combattre les gaz à effet de serre. Bien que les Etats-Unis soient le principal pays émetteur de gaz à effet de serre dans le monde, les autres Etats parties au protocole de Kyoto n'ont toutefois pas renoncé à poursuivre les négociations. L'Australie, suite à l'arrivée au pouvoir des travaillistes, l'a, pour sa part, ratifié le 12 décembre 2007.