

Introduction à la physique nucléaire et aux réacteurs nucléaires

Nassiba Tabti

A.E.S.S. Physique



UNIVERSITÉ LIBRE DE BRUXELLES, UNIVERSITÉ D'EUROPE

1 LA RADIOACTIVITÉ

- Découverte de la radioactivité
- Structure du noyau
- Stabilité du noyau
- Transmutation des noyaux
- Demie-vie

2 LES RÉACTIONS NUCLÉAIRES

- La fission
- La fusion

3 LES RÉACTEURS NUCLÉAIRES

- Les réacteurs à fission
- Les réacteurs à fusion

1 LA RADIOACTIVITÉ

- Découverte de la radioactivité
- Structure du noyau
- Stabilité du noyau
- Transmutation des noyaux
- Demie-vie

2 LES RÉACTIONS NUCLÉAIRES

- La fission
- La fusion

3 LES RÉACTEURS NUCLÉAIRES

- Les réacteurs à fission
- Les réacteurs à fusion

1 LA RADIOACTIVITÉ

- Découverte de la radioactivité
- Structure du noyau
- Stabilité du noyau
- Transmutation des noyaux
- Demie-vie

2 LES RÉACTIONS NUCLÉAIRES

- La fission
- La fusion

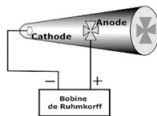
3 LES RÉACTEURS NUCLÉAIRES

- Les réacteurs à fission
- Les réacteurs à fusion

DÉCOUVERTE DE LA RADIOACTIVITÉ

La physique nucléaire a vu le jour en février 1896 avec la découverte de la radioactivité laquelle avait été préparée par la découverte des rayons X.

- 1895 : Découverte des rayons X par Röntgen
- Rayons X accompagnent-ils toujours la fluorescence ?
- 1896 : Découverte fortuite de Becquerel : sels d'uranium non fluorescents émettent spontanément un rayonnement très pénétrants
- Marie Curie nomma radioactivité le phénomène découvert par Becquerel
- 1897-1898 : Découverte par Pierre et Marie Curie de nouveaux éléments radioactifs : le polonium et le radium



En frappant parois en verre d'un tube à décharge, e^- le rendaient fluorescent \implies émission nouveau type de radiation = rayons X

DÉCOUVERTE DE LA RADIOACTIVITÉ

La physique nucléaire a vu le jour en février 1896 avec la découverte de la radioactivité laquelle avait été préparée par la découverte des rayons X.

- 1895 : Découverte des rayons X par Röntgen
- **Rayons X accompagnent-ils toujours la fluorescence ?**
- 1896 : Découverte fortuite de Becquerel : sels d'uranium non fluorescents émettent spontanément un rayonnement très pénétrants
- Marie Curie nomma radioactivité le phénomène découvert par Becquerel
- 1897-1898 : Découverte par Pierre et Marie Curie de nouveaux éléments radioactifs : le polonium et le radium

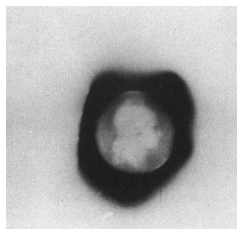


Matériau fluorescent (après exposition lumière) sur une plaque photographique enveloppée dans du papier noir \implies aucun rayon X ne venait altérer la plaque

DÉCOUVERTE DE LA RADIOACTIVITÉ

La physique nucléaire a vu le jour en février 1896 avec la découverte de la radioactivité laquelle avait été préparée par la découverte des rayons X.

- 1895 : Découverte des rayons X par Röntgen
- Rayons X accompagnent-ils toujours la fluorescence ?
- 1896 : Découverte fortuite de Becquerel : sels d'uranium non fluorescents émettent spontanément un rayonnement très pénétrants
- Marie Curie nomma radioactivité le phénomène découvert par Becquerel
- 1897-1898 : Découverte par Pierre et Marie Curie de nouveaux éléments radioactifs : le polonium et le radium



Rayons X \implies pas associés à la fluorescence
Uranium = agent actif

DÉCOUVERTE DE LA RADIOACTIVITÉ

La physique nucléaire a vu le jour en février 1896 avec la découverte de la radioactivité laquelle avait été préparée par la découverte des rayons X.

- 1895 : Découverte des rayons X par Röntgen
- Rayons X accompagnent-ils toujours la fluorescence ?
- 1896 : Découverte fortuite de Becquerel : sels d'uranium non fluorescents émettent spontanément un rayonnement très pénétrants
- **Marie Curie nomma radioactivité le phénomène découvert par Becquerel**
- 1897-1898 : Découverte par Pierre et Marie Curie de nouveaux éléments radioactifs : le polonium et le radium



DÉCOUVERTE DE LA RADIOACTIVITÉ

La physique nucléaire a vu le jour en février 1896 avec la découverte de la radioactivité laquelle avait été préparée par la découverte des rayons X.

- 1895 : Découverte des rayons X par Röntgen
- Rayons X accompagnent-ils toujours la fluorescence ?
- 1896 : Découverte fortuite de Becquerel : sels d'uranium non fluorescents émettent spontanément un rayonnement très pénétrants
- Marie Curie nomma radioactivité le phénomène découvert par Becquerel
- 1897-1898 : Découverte par Pierre et Marie Curie de nouveaux éléments radioactifs : le polonium et le radium

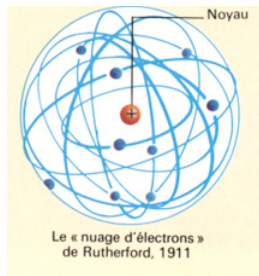


Constats :

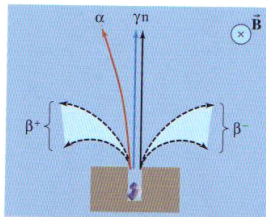
- 1g de radium dégage 10^5 fois la puissance dégagée lors de n'importe quelle réaction chimique
- facteurs influençant réactions chimiques : aucun effet sur la radioactivité
- atomes manifestaient la même radioactivité indépendamment de leur état chimique

} Radioactivité due
à un processus
inconnu

*Il a fallu attendre le modèle atomique de Rutherford (avec l'introduction du noyau) pour comprendre que le **noyau** était la source de la radioactivité \implies Physique **nucléaire***

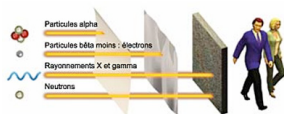


- Rayonnement trouvé par Becquerel \implies baptisé α par Rutherford qui démontra en 1908 qu'il s'agissait de noyaux d'hélium.
- En étudiant les proportions des émissions radioactives capable de traverser un obstacle \implies Rutherford trouva qu'il y avait différents types d'émissions radioactives \implies Classement de ces émissions par leur pouvoir de pénétration, leur masse et leur charge électrique



Emissions radioactives

α : noyaux d'Helium ${}^4_2\text{He}$
 β^- : électrons e^-
 β^+ : positons e^+
 γ : ondes électromagnétiques



Pouvoir de pénétration

Les émissions radioactives liées à la stabilité du noyau.

1 LA RADIOACTIVITÉ

- Découverte de la radioactivité
- Structure du noyau
- Stabilité du noyau
- Transmutation des noyaux
- Demie-vie

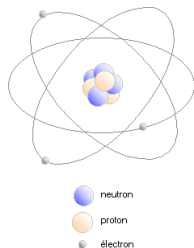
2 LES RÉACTIONS NUCLÉAIRES

- La fission
- La fusion

3 LES RÉACTEURS NUCLÉAIRES

- Les réacteurs à fission
- Les réacteurs à fusion

STRUCTURE DU NOYAU



Atome= nuage électronique en mouvement autour d'un noyau
Noyau :

- composé de protons et de neutrons
- 10^4 à 10^5 fois plus petit que l'atome tout entier [Taille noyau fm= 10^{-15} m]
- contient 99,9% masse totale atome

- Nombre de protons = Z [*numéro atomique*]
- Nombre de neutrons= N
- Total des nucléons= $N+Z= A$ [*nombre de masse*]



Désignation nuclide

Isotopes d'un élément : Atome dont le noyau a le même nombre de protons mais un nombre de neutrons différents

1 LA RADIOACTIVITÉ

- Découverte de la radioactivité
- Structure du noyau
- **Stabilité du noyau**
- Transmutation des noyaux
- Demie-vie

2 LES RÉACTIONS NUCLÉAIRES

- La fission
- La fusion

3 LES RÉACTEURS NUCLÉAIRES

- Les réacteurs à fission
- Les réacteurs à fusion

DÉFAUT DE MASSE ET ÉNERGIE DE LIAISON

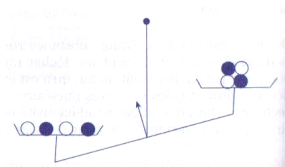
- Noyaux instables \implies Emissions radioactives
 - Noyaux stables \implies Aucune radioactivité
- } Nucléons forment un état lié
Cohésion du noyau due à la force nucléaire

DÉFAUT DE MASSE ET ÉNERGIE DE LIAISON

- Noyaux instables \implies Emissions radioactives
 - Noyaux stables \implies Aucune radioactivité
- } Nucléons forment un état lié
Cohésion du noyau due à la force nucléaire
- Diminution d'énergie potentielle lors de l'approche des nucléons à une distance en deça de la portée de la force nucléaire
 - Diminution d'énergie \implies Diminution de masse (*équivalence masse- énergie* : $E = mc^2$).

DÉFAUT DE MASSE ET ÉNERGIE DE LIAISON

- Noyaux instables \implies Emissions radioactives
 - Noyaux stables \implies Aucune radioactivité
- } Nucléons forment un état lié
Cohésion du noyau due à la force nucléaire
- Diminution d'énergie potentielle lors de l'approche des nucléons à une distance en deçà de la portée de la force nucléaire
 - Diminution d'énergie \implies Diminution de masse
(*équivalence masse- énergie* : $E = mc^2$).



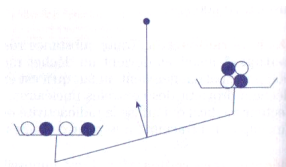
Qu'il soit stable ou instable

$$m_{\text{noyau}} < Zm_{\text{protons}} + Nm_{\text{neutrons}}$$

Défaut de masse : $\Delta m = \sum m_{\text{nucléons}} - m_{\text{noyau}}$

DÉFAUT DE MASSE ET ÉNERGIE DE LIAISON

- Noyaux instables \implies Emissions radioactives
 - Noyaux stables \implies Aucune radioactivité
- } Nucléons forment un état lié
Cohésion du noyau due à la force nucléaire
- Diminution d'énergie potentielle lors de l'approche des nucléons à une distance en deçà de la portée de la force nucléaire
 - Diminution d'énergie \implies Diminution de masse (équivalence masse- énergie : $E = mc^2$).



Qu'il soit stable ou instable

$$m_{\text{noyau}} < Zm_{\text{protons}} + Nm_{\text{neutrons}}$$

Défaut de masse : $\Delta m = \sum m_{\text{nucléons}} - m_{\text{noyau}}$

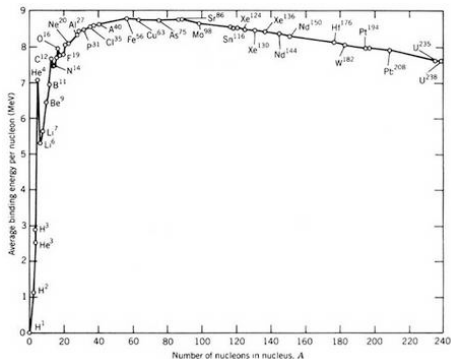
Pour séparer complètement les nucléons d'un noyau \implies Fournir au noyau une énergie appelée **énergie de liaison**

$$E_l = \Delta m \cdot c^2$$

ENERGIE DE LIAISON PAR NUCLÉON

Afin de comparer les énergies de liaison de différents noyaux, il est commode de calculer l'énergie de liaison moyenne par nucléon E_l/A .

- $E_l/A \nearrow$ jusqu'à $A \sim 50$ puis \searrow peu à peu
- Noyaux plus liés que la norme : ${}^4_2\text{He}$ et noyaux avec un nombre pair de protons et un nombre pair de neutrons (${}^{12}_6\text{C}$, ${}^{16}_8\text{O}$).



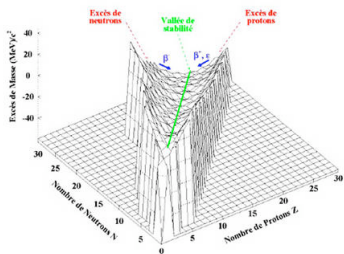
Courbe d'Aston

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Contributions de la courbe d'Aston par Bethe et Weizsäcker

- nucléons moins liés à la surface du noyau (*car moins de voisins*)
- $Z \approx N$ (*mécanique quantique : principe d'exclusion de Pauli*)
- répulsion électrique des protons
- Noyaux pairs-pairs plus stable que noyaux pairs-impairs et impairs-impairs (p^+ et n minimisent leur énergie en s'appariant)

Formule empirique de Bethe-Weizsäcker $\Rightarrow E_{\ell}/A (Z, N)$

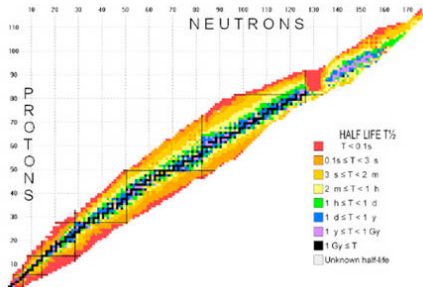


\rightarrow Relief reprenant l'énergie de liaison en fonction de Z et N

Creux = noyaux plus liés
Pics = noyaux moins liés

Représentation du début de la vallée de stabilité

Noyaux plus lourds ont besoin d'une plus grande proportion de neutrons pour compenser la répulsion des protons.



1 LA RADIOACTIVITÉ

- Découverte de la radioactivité
- Structure du noyau
- Stabilité du noyau
- **Transmutation des noyaux**
- Demie-vie

2 LES RÉACTIONS NUCLÉAIRES

- La fission
- La fusion

3 LES RÉACTEURS NUCLÉAIRES

- Les réacteurs à fission
- Les réacteurs à fusion

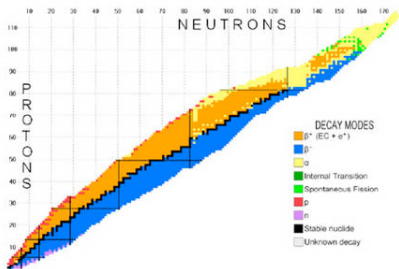
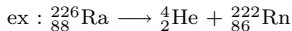
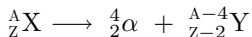


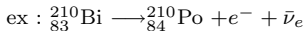
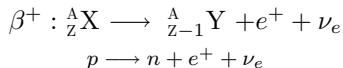
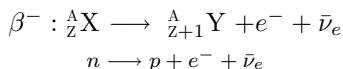
Figure 6: Chart of the nuclides for decay modes (created by NUCLIDES-ASDC)

Tout système tend à minimiser son énergie \implies transmutation d'un noyau en un autre

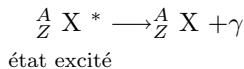
Radioactivité α



Radioactivité β



Radioactivité γ



accompagne
désintégration α ou β

1 LA RADIOACTIVITÉ

- Découverte de la radioactivité
- Structure du noyau
- Stabilité du noyau
- Transmutation des noyaux
- Demie-vie

2 LES RÉACTIONS NUCLÉAIRES

- La fission
- La fusion

3 LES RÉACTEURS NUCLÉAIRES

- Les réacteurs à fission
- Les réacteurs à fusion

DEMIE-VIE

Processus de transmutation quantique \implies Phénomène aléatoire
il est impossible de savoir quand un noyau donné va se transmuter

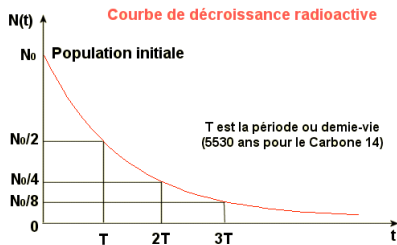
Chaque noyau identique a une probabilité identique de se désintégrer au cours du temps

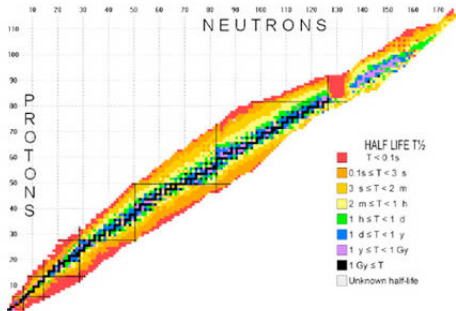
Loi de désintégration radioactive $\frac{dN}{dt} = -\lambda N$

NOMBRE DE NOYAUX À L'INSTANT T

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \text{ où } \lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$$

Il faut une **demie-vie** ($T_{1/2}$) pour que la moitié des noyaux de départ se désintègrent





Noyau	Période	Mode
Uranium 238	4.47 milliards d'années	Alpha
Potassium 40	1.28 milliards d'années	Bêta
Iode 129	15,7 millions d'années	Bêta
Plutonium 239	24 000 ans	Alpha
Carbone 14	5730 ans	Bêta
Radium 226	1602 ans	Alpha
Césium 137	30 ans	Bêta puis gamma
Strontium 90	28 ans	Bêta
Cobalt 60	5,26 ans	Bêta puis gamma
Polonium 210	138 jours	Alpha
Iode 131	8 jours	Bêta
Iode 130	12 heures	Bêta
Iode 132	2,3 heures	Bêta
Polonium 216	158 millisecondes	Alpha

1 LA RADIOACTIVITÉ

- Découverte de la radioactivité
- Structure du noyau
- Stabilité du noyau
- Transmutation des noyaux
- Demie-vie

2 LES RÉACTIONS NUCLÉAIRES

- La fission
- La fusion

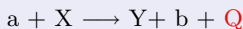
3 LES RÉACTEURS NUCLÉAIRES

- Les réacteurs à fission
- Les réacteurs à fusion

- *Première réaction nucléaire* provoquée en 1919 par Rutherford :



EQUATION D'UNE RÉACTION NUCLÉAIRE



avec énergie de la réaction $Q = (m_a + m_X - m_Y - m_b) c^2$

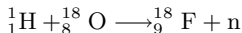
si $Q > 0$ réaction exothermique

si $Q < 0$ réaction endothermique

- *Découverte de la radioactivité artificielle* en 1934 par Frédéric Joliot et Irène Joliot Curie : un isotope radioactif du phosphore a été produit à partir de l'aluminium non radioactif en le bombardant de particules α .



- *Autre exemple de réaction nucléaire :*



Le fluor ${}^{18}_9\text{F}$ est isotope artificiel produit pour son usage en médecine dans les appareils TEP (Tomographie par Emissions de Positons).

1 LA RADIOACTIVITÉ

- Découverte de la radioactivité
- Structure du noyau
- Stabilité du noyau
- Transmutation des noyaux
- Demie-vie

2 LES RÉACTIONS NUCLÉAIRES

- La fission
- La fusion

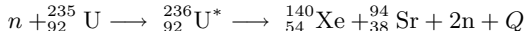
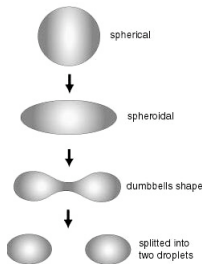
3 LES RÉACTEURS NUCLÉAIRES

- Les réacteurs à fission
- Les réacteurs à fusion

Idée de Fermi : Pour induire radioactivité artificielle plus facilement et pour produire des éléments transuraniens \implies Bombarder l'uranium avec des neutrons (pénétration du noyau plus facile car ils sont sans charges) !



Observation de la première fission nucléaire artificielle

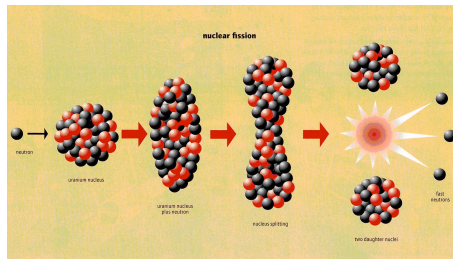
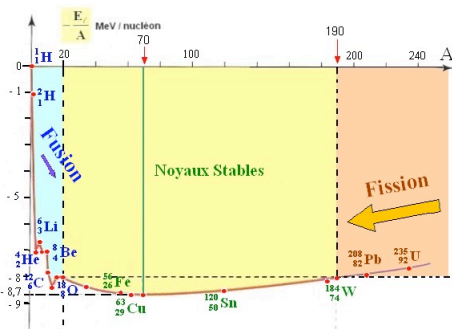


avec $Q \approx 200\text{MeV} \gg$ énergie libérée lors d'une réaction chimique

Cette équation représente une des réactions possibles de fission de l'uranium ${}_{92}^{236}\text{U}^$.*

*Modèle nucléaire de la goutte liquide
Après déformation, répulsion électrique
devient $>$ force nucléaire \implies Fission*

LA FISSION



1 LA RADIOACTIVITÉ

- Découverte de la radioactivité
- Structure du noyau
- Stabilité du noyau
- Transmutation des noyaux
- Demie-vie

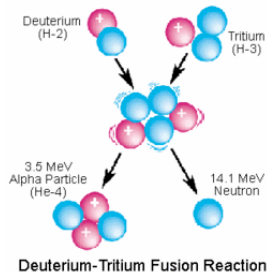
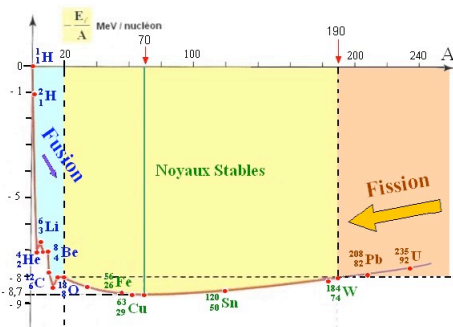
2 LES RÉACTIONS NUCLÉAIRES

- La fission
- La fusion

3 LES RÉACTEURS NUCLÉAIRES

- Les réacteurs à fission
- Les réacteurs à fusion

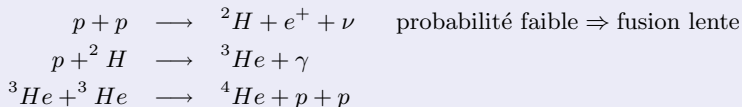
LA FUSION



Deux noyaux légers se combinent pour former un noyau plus lourd

- Pour fusionner des noyaux \implies Barrière de potentiel créée par leur répulsion coulombienne à surmonter
- Exemple : Pour approcher deux deutérons (${}^2_1\text{H}$) l'un de l'autre de sorte que la force nucléaire les fasse fusionner, chaque deutéron a besoin d'une énergie cinétique $\approx 200\text{keV}$.

RÉACTION DE FUSION NATURELLE : CHAÎNE P-P AU SEIN DU SOLEIL



1 LA RADIOACTIVITÉ

- Découverte de la radioactivité
- Structure du noyau
- Stabilité du noyau
- Transmutation des noyaux
- Demie-vie

2 LES RÉACTIONS NUCLÉAIRES

- La fission
- La fusion

3 LES RÉACTEURS NUCLÉAIRES

- Les réacteurs à fission
- Les réacteurs à fusion

1 LA RADIOACTIVITÉ

- Découverte de la radioactivité
- Structure du noyau
- Stabilité du noyau
- Transmutation des noyaux
- Demie-vie

2 LES RÉACTIONS NUCLÉAIRES

- La fission
- La fusion

3 LES RÉACTEURS NUCLÉAIRES

- Les réacteurs à fission
- Les réacteurs à fusion

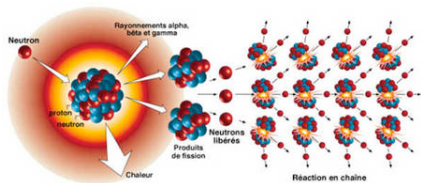
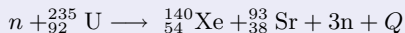
TYPE DE RÉACTEURS DE FISSION

Il existe deux types de réacteurs de fission :

- Réacteurs à neutrons lents (les plus répandus)
- Réacteurs à neutrons rapides

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES RÉACTEURS À NEUTRONS LENTS

Principaux réacteurs à fission fonctionnent à partir de la fission de noyaux lourds : ${}_{92}^{235}\text{U}$



Réaction en chaîne :

Entretien de la réaction par les neutrons produits

- Abondance naturelle : 0,7% ${}_{92}^{235}\text{U}$ (*fissible*) et 99,3% ${}_{92}^{238}\text{U}$ (*non fissible*)
- Rencontre des neutrons avec les noyaux n'est pas évidente \Rightarrow **Masse critique** : masse minimale à atteindre pour réaliser une réaction en chaîne (≈ 50 kg d' ${}_{92}^{235}\text{U}$ pur) \Rightarrow Combustible nucléaire : ${}_{92}^{235}\text{U}$ enrichi (teneur en ${}_{92}^{235}\text{U}$ remontée à 3%) ou non enrichi.

MODÉRATEUR

- Probabilité de fission de ${}_{92}^{235}\text{U}$ élevée pour des neutrons lents $\sim 1\text{eV}$.
- MAIS produits de fission : neutrons de hautes énergies $\sim 2\text{MeV} \implies$ ils doivent être ralentis (*neutrons thermiques*) pour induire d'autres fissions



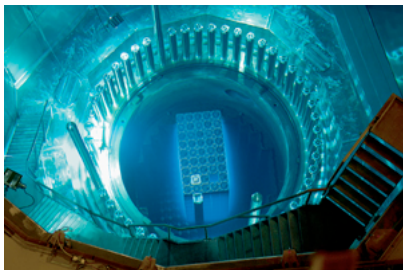
Utilisation d'un **modérateur**

Energie transmise par une particule incidente à une particule cible est maximale quand elles ont \pm la même masse.

Types de modérateur :

- Eau lourde (${}^2\text{D}_2\text{O}$) : efficace si combustible = U naturel
- Eau légère : efficace si combustible = U enrichi
- Graphite

L'Uranium est disposé dans des crayons de Zircaloy immergés dans le modérateur



Vue du coeur

MODÉRATEUR

- Probabilité de fission de ${}_{92}^{235}\text{U}$ élevée pour des neutrons lents $\sim 1\text{eV}$.
- MAIS produits de fission : neutrons de hautes énergies $\sim 2\text{MeV} \implies$ ils doivent être ralentis (*neutrons thermiques*) pour induire d'autres fissions



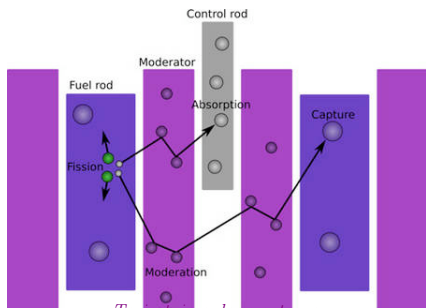
Utilisation d'un **modérateur**

Energie transmise par une particule incidente à une particule cible est maximale quand elles ont \pm la même masse.

Types de modérateur :

- Eau lourde (${}^2\text{D}_2\text{O}$) : efficace si combustible = U naturel
- Eau légère : efficace si combustible = U enrichi
- Graphite

L'Uranium est disposé dans des crayons de Zircaloy immergés dans le modérateur



Trajectoires des neutrons : dans un réacteur nucléaire

TAILLE CRITIQUE ET CONTRÔLE

Facteur multiplicatif k = rapport du nombre de neutrons d'une génération de la réaction en chaîne au nombre de neutrons de la génération précédente.

- $k = 1$ Système critique (*nombre neutrons produits = nombre neutrons perdus*)
- $k < 1$ Système est sous-critique
- $k > 1$ Système est super-critique (\implies fonte du réacteur et vaporisation de l'eau du modérateur)

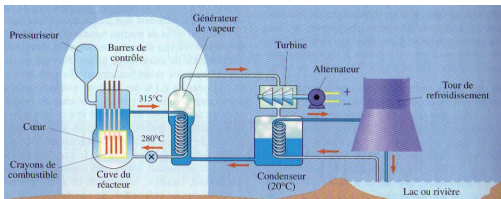


Maintien de $k = 1$ dans un réacteur nucléaire en insérant des barres de contrôle de Cadmium (qui ont une grande section efficace pour absorber les neutrons).

FONCTIONNEMENT DES REP

Les réacteurs à eau pressurisée (REP) sont les plus répandus à l'heure actuelle

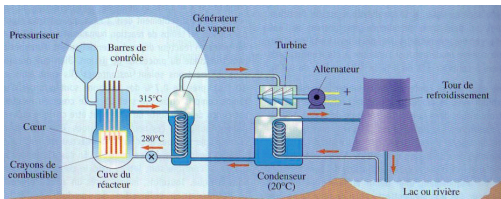
- **Cuve du réacteur = Coeur + modérateur**
- Eau du modérateur atteint $300^{\circ}\text{C} \Rightarrow$ Pression élevée empêche ébullition de l'eau
- Eau du modérateur sert également de matériau de refroidissement dans le circuit primaire
- Générateur de vapeur : il y a un échange thermique de l'eau du modérateur qui transfère sa chaleur à l'eau d'un circuit de refroidissement secondaire qui est convertie en vapeur
- Turbine \Rightarrow alternateur
- Condenseur : Refroidissement vapeur passée dans les turbines par eau d'un réservoir
- Eau du réservoir chauffée refroidie par évaporation avant d'être renvoyée dans le réservoir



FONCTIONNEMENT DES REP

Les réacteurs à eau pressurisée (REP) sont les plus répandus à l'heure actuelle

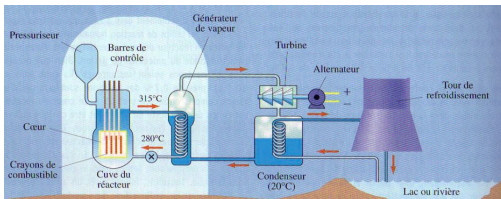
- Cuve du réacteur = Coeur + modérateur
- Eau du modérateur atteint $300^{\circ}\text{C} \Rightarrow$ Pression élevée empêche ébullition de l'eau
- Eau du modérateur sert également de matériau de refroidissement dans le circuit primaire
- Générateur de vapeur : il y a un échange thermique de l'eau du modérateur qui transfère sa chaleur à l'eau d'un circuit de refroidissement secondaire qui est convertie en vapeur
- Turbine \Rightarrow alternateur
- Condenseur : Refroidissement vapeur passée dans les turbines par eau d'un réservoir
- Eau du réservoir chauffée refroidie par évaporation avant d'être renvoyée dans le réservoir



FONCTIONNEMENT DES REP

Les réacteurs à eau pressurisée (REP) sont les plus répandus à l'heure actuelle

- Cuve du réacteur = Coeur + modérateur
- Eau du modérateur atteint 300°C \implies Pression élevée empêche ébullition de l'eau
- Eau du modérateur sert également de matériau de refroidissement dans le circuit primaire

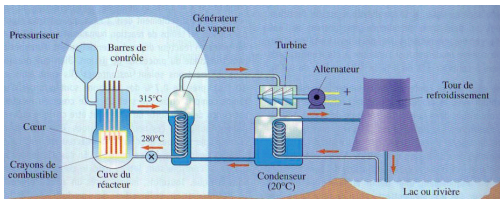


- Générateur de vapeur : il y a un échange thermique de l'eau du modérateur qui transfère sa chaleur à l'eau d'un circuit de refroidissement secondaire qui est convertie en vapeur
- Turbine \implies alternateur
- Condenseur : Refroidissement vapeur passée dans les turbines par eau d'un réservoir
- Eau du réservoir chauffée refroidie par évaporation avant d'être renvoyée dans le réservoir

FONCTIONNEMENT DES REP

Les réacteurs à eau pressurisée (REP) sont les plus répandus à l'heure actuelle

- Cuve du réacteur = Coeur + modérateur
- Eau du modérateur atteint 300°C \Rightarrow Pression élevée empêche ébullition de l'eau
- Eau du modérateur sert également de matériau de refroidissement dans le circuit primaire

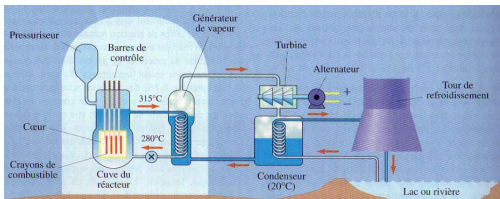


- Générateur de vapeur : il y a un échange thermique de l'eau du modérateur qui transfère sa chaleur à l'eau d'un circuit de refroidissement secondaire qui est convertie en vapeur
- Turbine \Rightarrow alternateur
- Condenseur : Refroidissement vapeur passée dans les turbines par eau d'un réservoir
- Eau du réservoir chauffée refroidie par évaporation avant d'être renvoyée dans le réservoir

FONCTIONNEMENT DES REP

Les réacteurs à eau pressurisée (REP) sont les plus répandus à l'heure actuelle

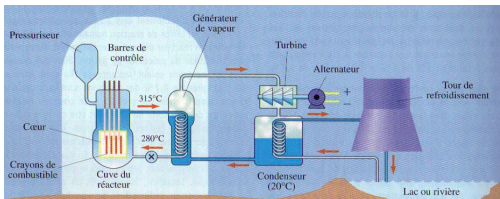
- Cuve du réacteur = Coeur + modérateur
- Eau du modérateur atteint 300°C \Rightarrow Pression élevée empêche ébullition de l'eau
- Eau du modérateur sert également de matériau de refroidissement dans le circuit primaire
- Générateur de vapeur : il y a un échange thermique de l'eau du modérateur qui transfère sa chaleur à l'eau d'un circuit de refroidissement secondaire qui est convertie en vapeur
- Turbine \Rightarrow alternateur
- Condenseur : Refroidissement vapeur passée dans les turbines par eau d'un réservoir
- Eau du réservoir chauffée refroidie par évaporation avant d'être renvoyée dans le réservoir



FONCTIONNEMENT DES REP

Les réacteurs à eau pressurisée (REP) sont les plus répandus à l'heure actuelle

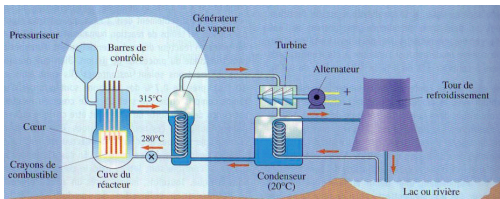
- Cuve du réacteur = Coeur + modérateur
- Eau du modérateur atteint 300°C \Rightarrow Pression élevée empêche ébullition de l'eau
- Eau du modérateur sert également de matériau de refroidissement dans le circuit primaire
- Générateur de vapeur : il y a un échange thermique de l'eau du modérateur qui transfère sa chaleur à l'eau d'un circuit de refroidissement secondaire qui est convertie en vapeur
- Turbine \Rightarrow alternateur
- Condenseur : Refroidissement vapeur passée dans les turbines par eau d'un réservoir
- Eau du réservoir chauffée refroidie par évaporation avant d'être renvoyée dans le réservoir



FONCTIONNEMENT DES REP

Les réacteurs à eau pressurisée (REP) sont les plus répandus à l'heure actuelle

- Cuve du réacteur = Coeur + modérateur
- Eau du modérateur atteint 300°C \Rightarrow Pression élevée empêche ébullition de l'eau
- Eau du modérateur sert également de matériau de refroidissement dans le circuit primaire
- Générateur de vapeur : il y a un échange thermique de l'eau du modérateur qui transfère sa chaleur à l'eau d'un circuit de refroidissement secondaire qui est convertie en vapeur
- Turbine \Rightarrow alternateur
- Condenseur : Refroidissement vapeur passée dans les turbines par eau d'un réservoir
- Eau du réservoir chauffée refroidie par évaporation avant d'être renvoyée dans le réservoir



- Produits de fission sont radioactifs
- Matériau du réacteur deviennent radioactifs (par activation des neutrons non capturés par l'Uranium)
 - ⇒ Gestion à long terme des déchets radioactifs
 - ⇒ Temps de vie d'un réacteur nucléaire $\simeq 30$ ans

RÉACTEURS À NEUTRONS RAPIDES

Ce type de réacteur utilise le principe de surgénération.

Principe du surgénérateur : Production de plus de matière fissible qu'il n'en consomme en transmutant isotopes fertiles en isotopes fissibles.

Exemple : $^{238}\text{U}/^{239}\text{Pu}$ ou $^{232}\text{Th}/^{233}\text{U}$

Intérêt :

- Multiplication considérable de la quantité d'énergie liée à l'extraction de l'Uranium
- Utilisation du Thorium : beaucoup plus abondant que l'Uranium
- pas d'enrichissement nécessaire et pas d'utilisation de modérateur

1 LA RADIOACTIVITÉ

- Découverte de la radioactivité
- Structure du noyau
- Stabilité du noyau
- Transmutation des noyaux
- Demie-vie

2 LES RÉACTIONS NUCLÉAIRES

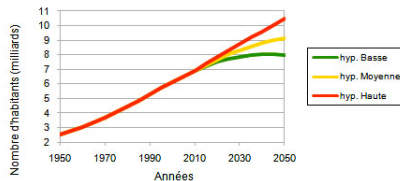
- La fission
- La fusion

3 LES RÉACTEURS NUCLÉAIRES

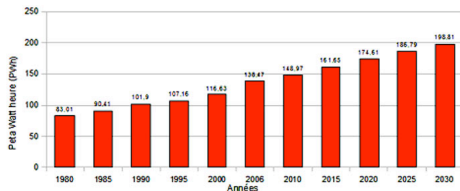
- Les réacteurs à fission
- Les réacteurs à fusion

DÉFI GRANDISSANT : DEMANDE ÉNERGÉTIQUE

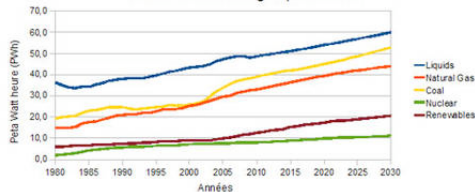
Évolution de la population mondiale (perspective)



Consommation énergétique mondiale (prévisions EIA, 2009)



Consommation énergétique annuelle

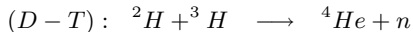
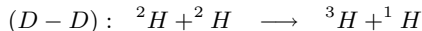
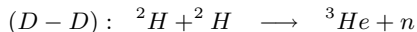
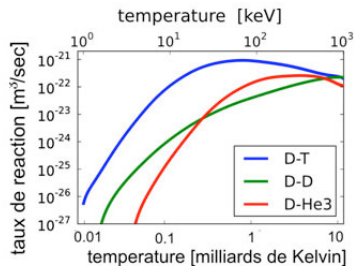


- Source d'énergies fossiles : charbon-pétrole- gaz \implies réserve limitée
- Source d'énergie non fossiles : énergie renouvelables, la fission (cycle combiné avec surgénérateur) et la fusion

TAUX DE RÉACTION R DES RÉACTIONS DE FUSIONS

Afin que les noyaux fusionnent, ils faut les confiner en leur apportant suffisamment d'énergie pour franchir la barrière électrostatique

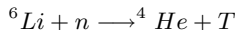
Taux de réaction R : quantifie la probabilité de la réaction de fusion



\implies Réaction la plus probable : D-T

INTÉRÊTS DE LA FUSION D-T

- D= isotope stable de H : *en abondance sur Terre dans l'eau par exemple*
- T= isotope radioactif de H ($T_{1/2} = 12,3\text{ans}$) : *quantité faible sur Terre mais peut être créée en utilisant les neutrons de la réaction D-T :*



Lithium en abondance sur Terre

- Avantage écologique : temps de vie des déchets \sim centaine d'années
- Production de beaucoup plus d'énergie que la fission

CRITÈRES DE PRODUCTION D'ÉNERGIE À PARTIR DE LA FUSION

- **Haute température** : $T > 10^8 K$ permettant aux noyaux de surmonter la répulsion électrique mutuelle. A cette température : gaz ionisé appelé **plasma**
- **Haute densité de particules** : pour augmenter le taux de collision et le taux de réaction
- **La durée du confinement** : une fois les noyaux rapprochés, ils doivent rester suffisamment longtemps proche pour que la réaction de fusion aie lieu.

CRITÈRE DE LAWSON (1957)

Si n est la densité de particules et τ est la durée de confinement, une des conditions nécessaires pour que l'énergie libérée devienne supérieure à l'énergie fournie au système :

$$D - T \quad : n\tau > 10^{20} \text{ s/m}^3$$

CRITÈRES DE PRODUCTION D'ÉNERGIE À PARTIR DE LA FUSION

- **Haute température** : $T > 10^8 K$ permettant aux noyaux de surmonter la répulsion électrique mutuelle. A cette température : gaz ionisé appelé **plasma**
- **Haute densité de particules** : pour augmenter le taux de collision et le taux de réaction
- **La durée du confinement** : une fois les noyaux rapprochés, ils doivent rester suffisamment longtemps proche pour que la réaction de fusion aie lieu.

CRITÈRE DE LAWSON (1957)

Si n est la densité de particules et τ est la durée de confinement, une des conditions nécessaires pour que l'énergie libérée devienne supérieure à l'énergie fournie au système :

$$D - T \quad : \quad n\tau > 10^{20} \text{ s/m}^3$$

CRITÈRES DE PRODUCTION D'ÉNERGIE À PARTIR DE LA FUSION

- **Haute température** : $T > 10^8 K$ permettant aux noyaux de surmonter la répulsion électrique mutuelle. A cette température : gaz ionisé appelé **plasma**
- **Haute densité de particules** : pour augmenter le taux de collision et le taux de réaction
- **La durée du confinement** : une fois les noyaux rapprochés, ils doivent rester suffisamment longtemps proche pour que la réaction de fusion aie lieu.

CRITÈRE DE LAWSON (1957)

Si n est la densité de particules et τ est la durée de confinement, une des conditions nécessaires pour que l'énergie libérée devienne supérieure à l'énergie fournie au système :

$$D - T \quad : \quad n\tau > 10^{20} \text{ s/m}^3$$

CRITÈRES DE PRODUCTION D'ÉNERGIE À PARTIR DE LA FUSION

- **Haute température** : $T > 10^8 K$ permettant aux noyaux de surmonter la répulsion électrique mutuelle. A cette température : gaz ionisé appelé **plasma**
- **Haute densité de particules** : pour augmenter le taux de collision et le taux de réaction
- **La durée du confinement** : une fois les noyaux rapprochés, ils doivent rester suffisamment longtemps proche pour que la réaction de fusion aie lieu.

CRITÈRE DE LAWSON (1957)

Si n est la densité de particules et τ est la durée de confinement, une des conditions nécessaires pour que l'énergie libérée deviennent supérieure à l'énergie fournie au système :

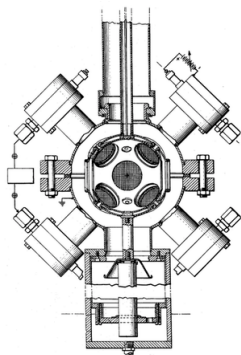
$$D - T \quad : \quad n\tau > 10^{20} \text{ s/m}^3$$

CONFINEMENT

Pour maintenir le plasma à une température élevée suffisante, il faut le confiner c'est-à-dire notamment l'éloigner de tout ce qui peut le refroidir

Confinement inertiel

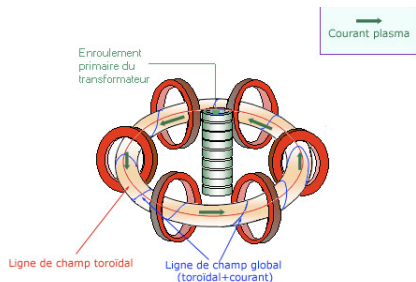
Micro-explosions en utilisant des lasers d'une petite quantité de combustibles permettant d'atteindre des conditions de températures et de pression suffisantes



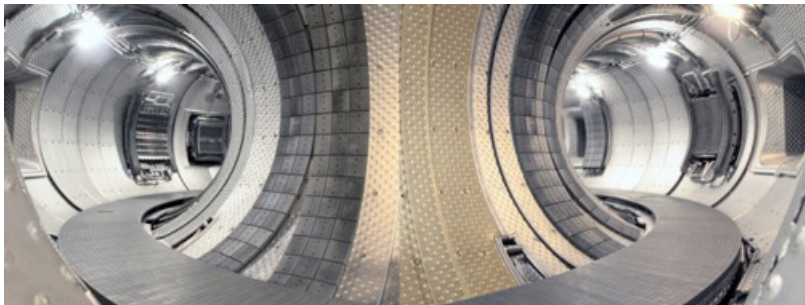
Confinement magnétique

Confinement du plasma avec un champ magnétique

Particules du plasma = ions déviés par un champ magnétique (Force de Lorentz)



Champ magnétique résultant est hélicoïdal



Intérieur d'un tokamak

Merci de votre attention !

- Benson, *Physique*, Editions De Boeck, 2009.
- C. Etiévant, *L'Energie Thermonucléaire*, Presses Universitaires de France, 1962.
- Ch. Leclercq-Willain, *Cours de Physique Nucléaire- 1ère Licence Sciences Physiques ULB*.
- P. Radvanyi et M. Bordry, *La radioactivité artificielle et son histoire*, Editions du Seuil, 1984.
- R. Rosseel, *La centrale nucléaire de Tihange*, Electrabel, 1992.
- S.S.M. Wong, *Introductory Nuclear Physics*, Wiley-Interscience Publications, 1998.

- www.laradioactivite.com
- www.futura-sciences.com