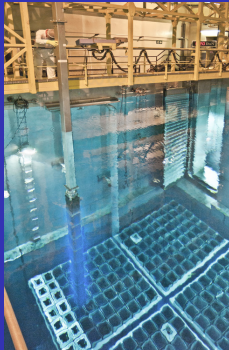


# Introduction aux cours de Génie Nucléaire.

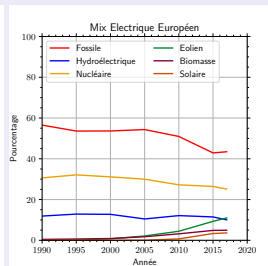
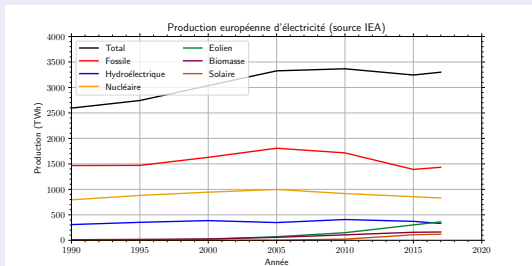
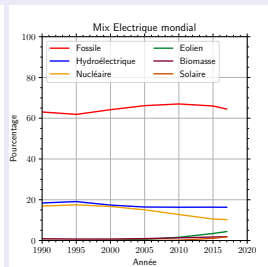
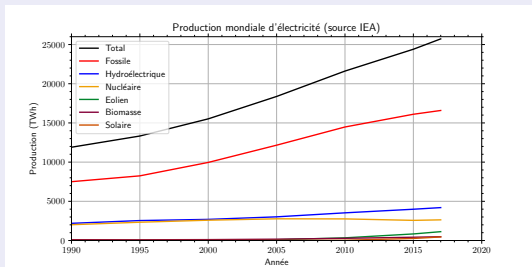


F. Ravelet

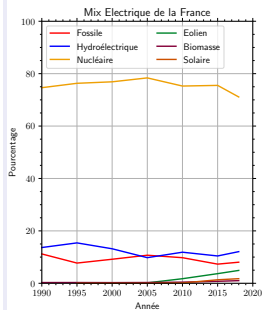
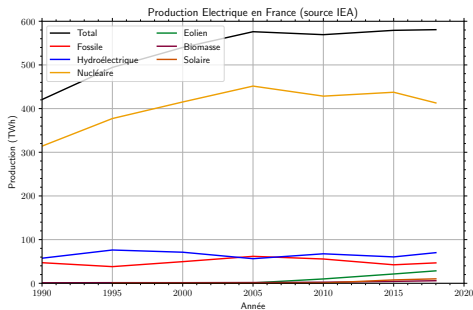
Laboratoire d'Ingénierie des Fluides et Systèmes Energétiques - Arts et Metiers Institute of Technology

1<sup>er</sup> mars 2021

# La part du nucléaire dans l'électricité au niveau mondial et européen



## La part du nucléaire dans l'électricité en France



## Cartographie mondiale (source Elecnuc 2019, CEA)

Pays	En marche (2018)			Construction (2018)		Arrêtés (1950-2018)	
	GWe	#	%	GWe	#	GWe	#
1. Etats-Unis	98.3	97	19.3	2.2	2	15.7	36
2. France	63.1	58	71.7	1.6	1	3.8	12
3. Chine (11è en 2010, 20è en 2000)	42.8	46	4.2	10.9	11	0	0
4. Japon	35.9	37	6.2 <sup>†</sup>	2.6	2	12.8	23
5. Russie	27.2	35	17.9	3.6	5	2.1	8
6. Corée du Sud	22.5	24	23.7	5.3	4	0.5	1
7. Canada	13.5	19	14.9	0	0	2.1	6
8. Ukraine	13.1	15	53.0	1.9	2	3.5	4
9. Allemagne (5è en 2010)	9.5	7	11.7	0	0	16.9	29
10. Royaume-Uni	8.9	15	17.7	1.6	1	4.7	30
11. Suède	8.6	8	40.3	0	0	2.3	5
12. Espagne	7.1	7	20.4	0	0	1	3
13. Inde	6.2	22	3.1	4.8	7	0	0
14. Belgique	5.9	7	39.0	0	0	0.01	1
15. Taiwan	4.4	5	n.c.	2.6	2	0.6	1
31 pays + 4 à venir	395.2	447	13.2 (10.5*)	54.2	53	73.1	176

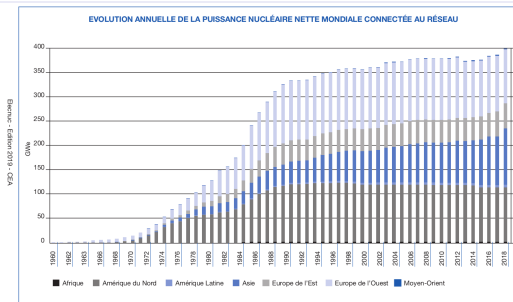
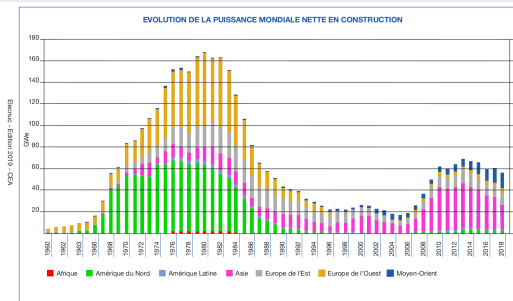
% : pourcentage de l'électricité produite. <sup>†</sup> : avant Fukushima, environ 18%. Seuls 9 réacteurs ont produit en 2018. \* : ensemble de l'électricité mondiale (31 pays nucléaires produisent 75% de l'électricité mondiale)

### Faits marquants :

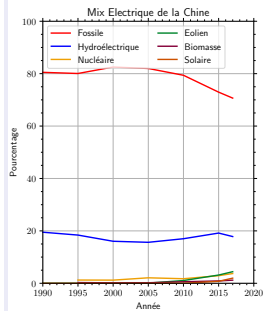
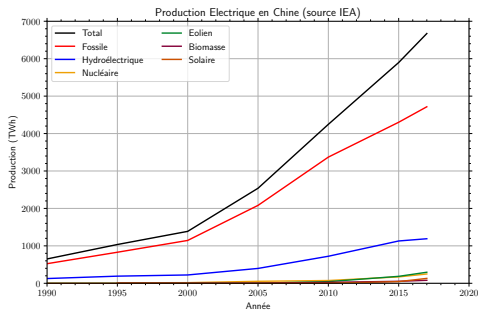
- En 2018, 9 mises en service dont 7 en Chine (+10.3 GW) et 7 arrêts définitifs (-5.4 GW). Premiers réacteurs de Gén. III
- Le Japon souhaite une part de 20% à horizon 2030
- La Chine prévoit 120 GW en 2030
- L'Inde prévoit une vingtaine de réacteurs en plus d'ici 2030



# Historique du développement du nucléaire par région (source Elecnucl 2019, CEA)

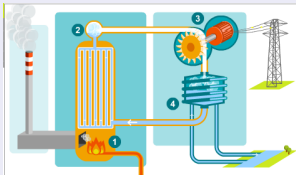


## La part du nucléaire dans l'électricité en Chine



# Centrale nucléaire de production d'électricité

- Une centrale électrique...



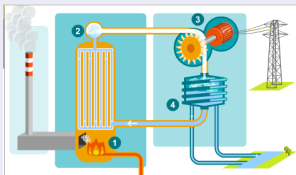
Centrale au charbon (Belgique)



Centrale nucléaire de Golfech (Tarn et Garonne)

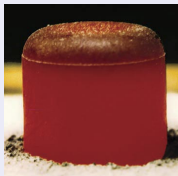
## Centrale nucléaire de production d'électricité

- Une centrale électrique...



Centrale au charbon (Belgique)

- Avec une source chaude un peu particulière

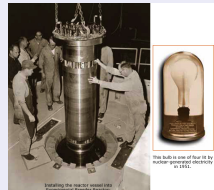
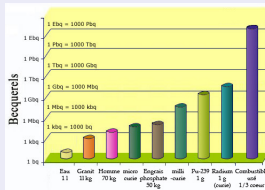
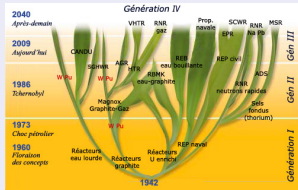
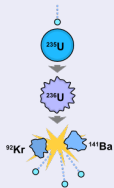


Lingot de Plutonium 238, rougeoyant sous l'effet de sa radioactivité naturelle



Centrale nucléaire de Golfech (Tarn et Garonne)

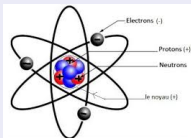
# Problématique : concevoir un réacteur nucléaire



- D'où vient l'énergie dégagée ? ⇒ Noyaux atomiques, radioactivité, fission
- Comment induire des réactions de fission ? ⇒ Neutronique : sections efficaces
- Comment entretenir une réaction en chaîne ? ⇒ Neutronique : flux, taux de réaction, criticité
- Comment garantir la sûreté ? ⇒ Neutronique : effets de température,...
- Quel concept retenir ? ⇒ Choix économiques, développement d'une filière pour le cycle du combustible
- Pas de  $\text{CO}_2$  mais des déchets, épuisement de  $^{235}\text{U}$  ⇒ Filières du futur ?

# Atomes : un concept clé pour la chimie et les matériaux

- Démocrite (460 - 370 av. J.-C.). Matière : particules minuscules et indivisibles s'accrochant entre elles
- Dalton (1803). « Element » & composés chimiques. Réaction chimique : réarrangement
- Mendeleïev (1869) : rangement par masse atomique, modèle prédisant propriétés d'éléments non découverts
- Rutherford (1911) & Bohr (1913) : modèle « planétaire ». Noyau entouré d'électrons + quantification
- Sur terre : 83 éléments « primordiaux »



### Tableau périodique des éléments chimiques

Groupes	1 A	2 A											13 B	14	15	16	17	18			
Périodes	1	2											3	4	5	6	7	8			
1	<b>Hydrogène</b> 1 H 1,00794																		<b>Hélium</b> 2 He 4,002602		
2	<b>Lithium</b> 3 Li 6,941	<b>Béryllium</b> 4 Be 9,0121831											<b>Bore</b> 5 B 10,811	<b>Carbone</b> 6 C 12,0107	<b>Azote</b> 7 N 14,00643	<b>Oxygène</b> 8 O 15,999	<b>Fluor</b> 9 F 18,9984032	<b>Neon</b> 10 Ne 20,1797			
3	<b>Sodium</b> 11 Na 22,98976928	<b>Magnésium</b> 12 Mg 24,304											<b>Aluminium</b> 13 Al 26,9815385	<b>Silicium</b> 14 Si 28,0855	<b>Phosphore</b> 15 P 30,973762	<b>Soufre</b> 16 S 32,065	<b>Chlore</b> 17 Cl 35,453	<b>Argon</b> 18 Ar 39,948			
4	<b>Potassium</b> 19 K 39,0983	<b>Calcium</b> 20 Ca 40,078	<b>Scandium</b> 21 Sc	<b>Titane</b> 22 Ti	<b>Vanadium</b> 23 V	<b>Chrome</b> 24 Cr	<b>Manganèse</b> 25 Mn	<b>Fer</b> 26 Fe	<b>Cobalt</b> 27 Co	<b>Nickel</b> 28 Ni	<b>Cuivre</b> 29 Cu	<b>Zinc</b> 30 Zn	<b>Gallium</b> 31 Ga	<b>Germanium</b> 32 Ge	<b>Arsenic</b> 33 As	<b>Sélénium</b> 34 Se	<b>Brome</b> 35 Br	<b>Krypton</b> 36 Kr			
5	<b>Rubidium</b> 37 Rb 85,4678	<b>Strontium</b> 38 Sr 87,62	<b>Yttrium</b> 39 Y	<b>Zirconium</b> 40 Zr	<b>Niobium</b> 41 Nb	<b>Molibdène</b> 42 Mo	<b>Technetium</b> 43 Tc	<b>Ruthénium</b> 44 Ru	<b>Rhodium</b> 45 Rh	<b>Palladium</b> 46 Pd	<b>Argent</b> 47 Ag	<b>Cadmium</b> 48 Cd	<b>Indium</b> 49 In	<b>Étain</b> 50 Sn	<b>Antimoine</b> 51 Sb	<b>Tellure</b> 52 Te	<b>Jode</b> 53 I	<b>Xénon</b> 54 Xe			
6	<b>Césium</b> 55 Cs 132,90545	<b>Baryum</b> 56 Ba	<b>Lanthanides</b> 57-71		<b>Hafnium</b> 72 Hf	<b>Ta</b> 73	<b>Tungstène</b> 74 W	<b>Ré</b> 75	<b>Osmium</b> 76 Os	<b>Iridium</b> 77 Ir	<b>Platine</b> 78 Pt	<b>Or</b> 79	<b>Argent</b> 80 Ag	<b>Mercure</b> 81 Hg	<b>Thallium</b> 82 Tl	<b>Plomb</b> 83 Pb	<b>Bismuth</b> 84 Bi	<b>Po</b> 85	<b>Astatoine</b> 86 At	<b>Radium</b> 88 Ra	<b>Actinides</b> 89-103
7	<b>Francium</b> 87 Fr	<b>Radium</b> 88 Ra			<b>Ré</b> 104	<b>Db</b> 105	<b>Sg</b> 106	<b>Bh</b> 107	<b>Hs</b> 108	<b>Mt</b> 109	<b>Ds</b> 110	<b>Rg</b> 111	<b>Cn</b> 112	<b>Nh</b> 113	<b>Fl</b> 114	<b>Lv</b> 115	<b>Ts</b> 116	<b>Og</b> 117	<b>Uu</b> 118		
			<b>Lanthane</b> 57	<b>Cérite</b> 58	<b>Praseodyme</b> 59	<b>Néodyme</b> 60	<b>Europ</b> 61	<b>Samarium</b> 62	<b>Europ</b> 63	<b>Gadolinium</b> 64	<b>Terbium</b> 65	<b>Dysprosium</b> 66	<b>Ho</b> 67	<b>Erbium</b> 68	<b>Thulium</b> 69	<b>Ytterbium</b> 70	<b>Lutétium</b> 71				
			<b>Actinium</b> 89	<b>Th</b> 90	<b>Pa</b> 91	<b>U</b> 92	<b>Np</b> 93	<b>Pu</b> 94	<b>Am</b> 95	<b>Cm</b> 96	<b>Bk</b> 97	<b>Cf</b> 98	<b>Es</b> 99	<b>Fm</b> 100	<b>Md</b> 101	<b>No</b> 102	<b>Lr</b> 103				

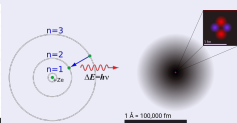
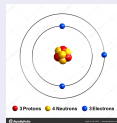
Alcalins
Alcalino-terreux
Lanthanides
Actinides
Métaux de transition
Métaux pauvres
Métalloïdes
Autres non-métaux
Halogènes
Gaz nobles
Non classés

primordial
synthésisés en laboratoire
synthésisés en astrophysique

## Rappels de Physique atomique : cours de M. Pereira (GE2)

- Atomes : noyau + cortège électronique
  - ▶ **Elément** chimique = **numéro atomique  $Z$**  (nombre de protons dans le noyau)
  - ▶ Atome neutre électriquement (nombre électrons = nombre de protons)
  - ▶ **Electrons** organisés en **couches** (effet photoélectrique, **liaisons chimiques**)

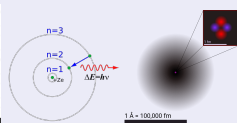
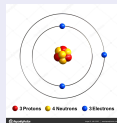
Charge électron	$-e$	$-1.6 \times 10^{-19}$ C
Unité pratique : l'électronvolt	eV	$1.6 \times 10^{-19}$ J
Masse électron	$m_e$	$9.109 \times 10^{-31}$ kg
Masse proton	$m_p$	$1.672 \times 10^{-27}$ kg
Permittivité du vide	$\epsilon_0$	$8.854 \times 10^{-12}$ F.m <sup>-1</sup>
Constante de Planck	$h$	$6.626 \times 10^{-34}$ J.s



## Rappels de Physique atomique : cours de M. Pereira (GE2)

- Atomes : noyau + cortège électronique
  - ▶ **Elément** chimique = **numéro atomique  $Z$**  (nombre de protons dans le noyau)
  - ▶ Atome neutre électriquement (nombre électrons = nombre de protons)
  - ▶ **Electrons** organisés en **couches** (effet photoélectrique, **liaisons chimiques**)
- Principaux résultats :
  - ▶ Relation de Planck-Einstein :  $E = h\nu$
  - ▶ Relation de de Broglie (dualité onde-corpuscule) :  $\lambda = \frac{h}{p}$
  - ▶ Loi de Coulomb (**interaction électrostatique**) :  $F = \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0 r^2}$
  - ▶ Postulat de Bohr : périmètre orbite multiple de  $\lambda$  ( $n$  un entier)
  - ▶ Calcul de la dimension et de l'énergie de liaison de l'électron dans l'atome d'hydrogène.

Charge électron	$-e$	$-1.6 \times 10^{-19}$ C
Unité pratique : l'électronvolt	eV	$1.6 \times 10^{-19}$ J
Masse électron	$m_e$	$9.109 \times 10^{-31}$ kg
Masse proton	$m_p$	$1.672 \times 10^{-27}$ kg
Permittivité du vide	$\epsilon_0$	$8.854 \times 10^{-12}$ F.m <sup>-1</sup>
Constante de Planck	$h$	$6.626 \times 10^{-34}$ J.s





## Rappels de Physique atomique : cours de M. Pereira (GE2)

- Atomes : noyau + cortège électronique
  - ▶ **Elément** chimique = **numéro atomique**  $Z$  (nombre de protons dans le noyau)
  - ▶ Atome neutre électriquement (nombre électrons = nombre de protons)
  - ▶ **Electrons** organisés en **couches** (effet photoélectrique, **liaisons chimiques**)

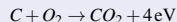
### ● Principaux résultats :

- ▶ Relation de Planck-Einstein :  $E = h\nu$
- ▶ Relation de de Broglie (dualité onde-corpuscule) :  $\lambda = \frac{h}{p}$
- ▶ Loi de Coulomb (**interaction électrostatique**) :  $F = \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0 r^2}$
- ▶ Postulat de Bohr : périmètre orbite multiple de  $\lambda$  ( $n$  un entier)
- ▶ Calcul de la dimension et de l'énergie de liaison de l'électron dans l'atome d'hydrogène.

Charge électron	$-e$	$-1.6 \times 10^{-19}$ C
Unité pratique : l'électronvolt	eV	$1.6 \times 10^{-19}$ J
Masse électron	$m_e$	$9.109 \times 10^{-31}$ kg
Masse proton	$m_p$	$1.672 \times 10^{-27}$ kg
Permittivité du vide	$\epsilon_0$	$8.854 \times 10^{-12}$ F.m <sup>-1</sup>
Constante de Planck	$h$	$6.626 \times 10^{-34}$ J.s



- **Dimension des atomes** : de  $100 \times 10^{-12}$  m (hydrogène) à  $600 \times 10^{-12}$  m (césium)
- **Dimension des noyaux** : de  $1 \times 10^{-15}$  m à  $16 \times 10^{-15}$  m
- **Energies « chimiques »**  $\simeq$  eV



# Energie nucléaire et radioactivité : cours de F. Ravelet 1 (GE2)

## ● Constitution des noyaux

- ▶ Il existe des atomes de masses atomiques différentes chimiquement indiscernables (Découverte rapportée par Soddy en 1913 en étudiant la radioactivité)
- ▶ Noyau de **nombre de masse  $A$** ,  ${}^A_ZX$  formé de  $Z$  protons et  $A - Z$  **neutrons**
- ▶ Deux noyaux de même  $Z$  et de  $A$  différents = **isotopes**
- ▶ Nombre d'isotopes observés à l'état naturel : 2 à 3 par élément
- ▶ protons et neutrons **liés par interaction forte**
- ▶ force à **très courte portée** (fm) et **très intense** (1000× électromagnétique)
- ▶ Existence d'une « vallée de stabilité »

## ● Energie de liaison nucléaire

- ▶ Energie de masse  $E = m_0c^2$  : une forme d'énergie potentielle
- ▶ Energie de liaison : énergie à fournir pour briser une liaison.
- ▶ Lien entre défaut de masse et énergie de liaison
- ▶ Les isobares ( $A = \text{cte}$ ) n'ont pas la même masse : certains sont plus légers donc plus stables
- ▶ Modèle de la goutte : vallée de stabilité
- ▶ Etudes des principaux modes : décroissance par émission de particules  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$
- ▶ Calculs d'énergie de réactions à partir de tables de masse
- ▶ Lois de décroissance radioactive (notions de période)

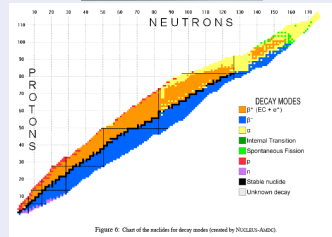
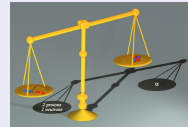
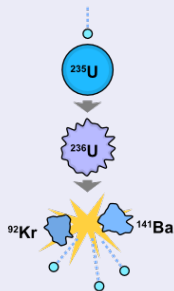
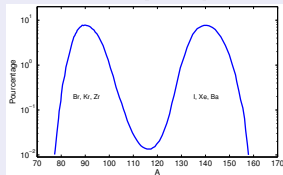
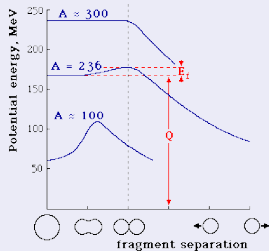


Figure 6. Chart of the nuclides for decay modes (created by NUCLEUS-AUDC).

## Fission nucléaire : cours de B. Mercier 1 (GE2)

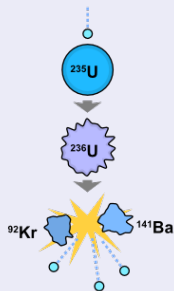


- Certains noyaux lourds et fragiles peuvent se casser en deux fragments
- Réaction exo-énergétique pour  $A \gtrsim 100$



Distribution statistique des produits de fission pour



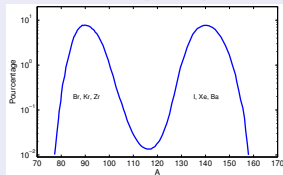
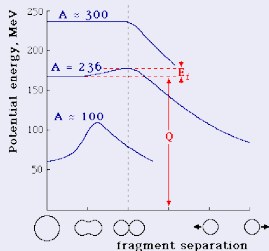


- Mais déformation initiale = barrière de fission

$$E_{barriere} = 19.0 - 0.36 \frac{Z^2}{A} + \epsilon \text{ MeV}$$

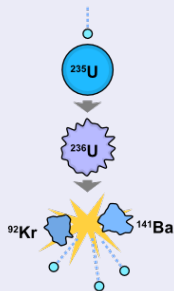
avec  $\epsilon = 0$  pour  $Z$  pair  $A - Z$  pair,  $\epsilon = 0.4$  pour pair/impair et  $\epsilon = 0.7$  pour impair/impair

- Fission spontanée très rare (probabilité  $\approx 10^{-6}$  par désintégration pour  $^{238}\text{U}$ )



Distribution statistique des produits de fission pour



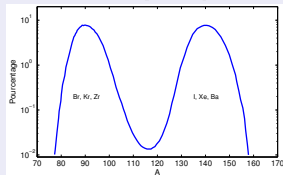
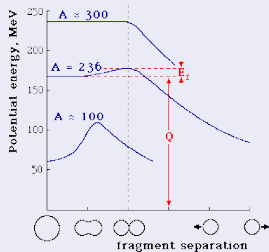


- Mais déformation initiale = barrière de fission

$$E_{barriere} = 19.0 - 0.36 \frac{Z^2}{A} + \epsilon \text{ MeV}$$

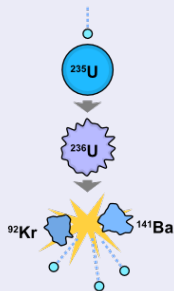
avec  $\epsilon = 0$  pour  $Z$  pair  $A - Z$  pair,  $\epsilon = 0.4$  pour pair/impair et  $\epsilon = 0.7$  pour impair/impair

- Fission spontanée très rare (probabilité  $\approx 10^{-6}$  par désintégration pour  $^{238}\text{U}$ )
- Un neutron se liant à un noyau peut provoquer une fission : **calculs pour  $^{238}\text{U}$  et  $^{235}\text{U}$**

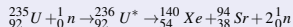


Distribution statistique des produits de fission pour

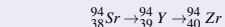
$^{235}\text{U}$ .



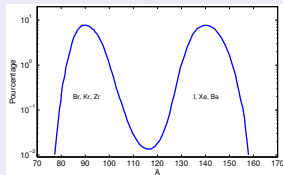
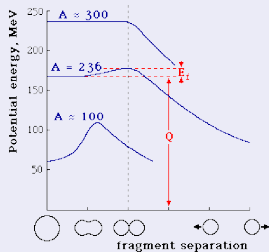
- Plusieurs centaines de réactions possibles. Exemple :



- Produits de fission radioactifs :

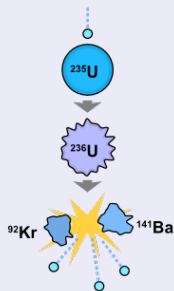


- Calcul de l'énergie de fission :  $^{140}_{58}\text{Ce} = 139.905446 \text{ u}$   
et  $^{94}_{40}\text{Zr} = 93.906313 \text{ u}$

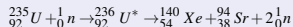


Distribution statistique des produits de fission pour

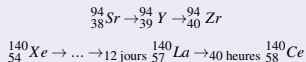




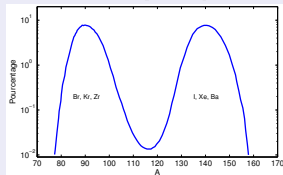
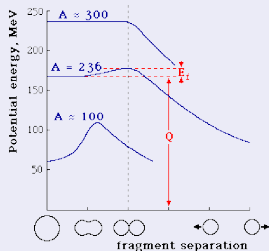
- Plusieurs centaines de réactions possibles. Exemple :



- Produits de fission radioactifs :



- Calcul de l'énergie de fission :  $^{140}_{58}\text{Ce} = 139.905446 \text{ u}$   
et  $^{94}_{40}\text{Zr} = 93.906313 \text{ u}$
- Deux à trois neutrons libres : possibilité d'entretien des fissions (réaction en chaîne). Energie des neutrons  $\approx 2 \text{ MeV}$



Distribution statistique des produits de fission pour

$^{235}_{92}\text{U}$ .

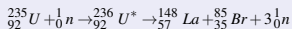
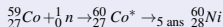
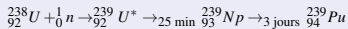
## Neutronique

- Neutronique : étude du cheminement des neutrons dans la matière et des réactions induites
- Réaction nucléaire : interaction entre particule-projectile et noyau-cible
- Pour un neutron traversant un bloc de matière :

- ▶ Fuite

- ▶ Interaction

- ★ Diffusion : le neutron « rebondit » (en perdant de l'énergie)
- ★ Absorption :  ${}^A_Z X + {}^1_0 n \rightarrow {}^{A+1}_Z X^*$  ; noyau excité (émission  $\gamma$ ), souvent radioactif (phénomène d'activation), ou provoque une fission :



- Probabilité de chaque réaction mesurée par la « section efficace »

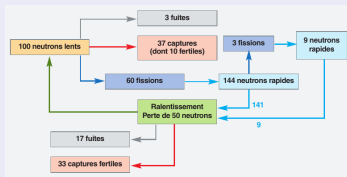
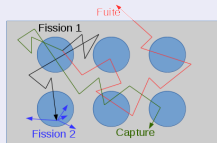


## Quelques valeurs de section efficace microscopique

	$\sigma_a$ (barns) thermiques (25.3 meV)	$\sigma_a$ (barns) rapides (2 MeV)	$\sigma_f$ (barns) thermiques (25.3 meV)	$\nu$ nbre neutrons réémis	$\sigma_f$ (barns) rapides (2 MeV)	$\nu$ nbre neutrons réémis	$\sigma_s$ (barns) thermiques (25.3 meV)	$\sigma_s$ (barns) rapides (2 MeV)
$^{235}\text{U}$	681	1.37	582	2.47	1.27	2.46	13.8	3.5
$^{238}\text{U}$	2.7	0.7	0	0	0.52	2.88	8.9	4
$^{239}\text{Pu}$	1011	2.0	742	2.91	1.9	2.88	7.7	3.9
$^1\text{H}$	0.322						30.3	2
$^2\text{H}$	0.0005						4.3	
$^{10}\text{B}$	3840						4.5	
$^{12}\text{C}$	0.0034						4.9	
$^{16}\text{O}$	0.0002						3.8	

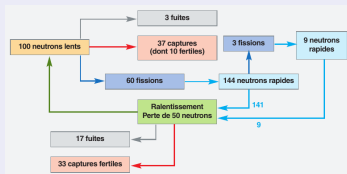
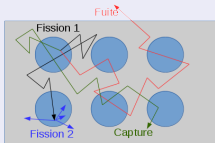
## Condition de criticité : cours de B. Mercier (GE3)

- Criticité  $k$  : nombre de neutrons produits par unité de temps / nombre de neutrons « disparaissant » par unité de temps (fuite + absorptions)
- Si  $k > 1$  (**sur-critique**) : le flux de neutrons et donc le taux de fission augmentent
- Si  $k = 1$  (**critique**) : le flux de neutrons et donc le taux de fission sont constants
- Si  $k < 1$  (**sous-critique**) : le flux de neutrons et donc le taux de fission diminuent



## Condition de criticité : cours de B. Mercier (GE3)

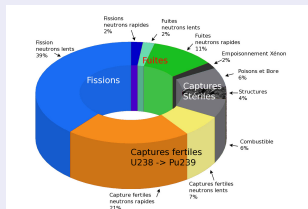
- Criticité  $k$  : nombre de neutrons produits par unité de temps / nombre de neutrons « disparaissant » par unité de temps (fuite + absorptions)
- Si  $k > 1$  (**sur-critique**) : le flux de neutrons et donc le taux de fission augmentent
- Si  $k = 1$  (**critique**) : le flux de neutrons et donc le taux de fission sont constants
- Si  $k < 1$  (**sous-critique**) : le flux de neutrons et donc le taux de fission diminuent



- Naïvement (milieu homogène infini) :

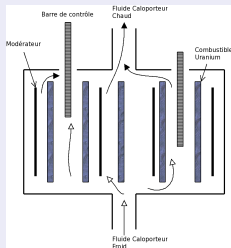
$$k_{\infty} = \frac{v \Sigma_f}{\Sigma_a}$$

- Deux voies possibles pour un réacteur :
  - ▶ **neutrons rapides** (2 MeV) : réactions utiles favorisées, transmutations des actinides, possibilité de surgénération.  
**Mais faibles sections efficaces microscopiques : combustible fortement enrichi**
  - ▶ **neutrons lents** (0.1 eV) : plus d'interactions, possibilité d'employer un combustible peu ou pas enrichi  
**Nécessité d'un modérateur** (ralentisseur de neutron), **risque d'absorptions stériles pendant le ralentissement**



## Notion de filière : combinaison Combustible / Caloporteur / Modérateur

### Composants du cœur d'un réacteur nucléaire

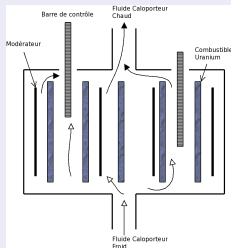


#### • « Combustible » (matières fissiles et fertiles)

- ▶ Uranium naturel (99.3%  $^{238}\text{U}$  et 0.7%  $^{235}\text{U}$ )
- ▶ Uranium enrichi ( $^{235}\text{U} \geq 3\%$ )
- ▶ Plutonium (Artificiel :  $^{238}\text{U} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{239}\text{Pu}$ )
- ▶ Thorium (à convertir selon  $^{232}\text{Th} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{233}\text{U}$ )

## Notion de filière : combinaison Combustible / Caloporteur / Modérateur

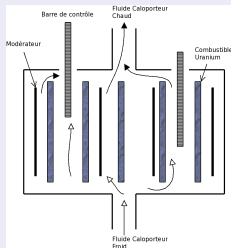
### Composants du cœur d'un réacteur nucléaire



- « **Combustible** » (matières fissiles et fertiles)
  - ▶ Uranium naturel (99.3%  $^{238}\text{U}$  et 0.7%  $^{235}\text{U}$ )
  - ▶ Uranium enrichi ( $^{235}\text{U} \geq 3\%$ )
  - ▶ Plutonium (Artificiel :  $^{238}\text{U} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{239}\text{Pu}$ )
  - ▶ Thorium (à convertir selon  $^{232}\text{Th} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{233}\text{U}$ )
- **Caloporteur** (évacuation de la chaleur)
  - ▶ Gaz sous pression
  - ▶ Eau lourde
  - ▶ Eau ordinaire
  - ▶ Métal liquide
  - ▶ Sel fondu

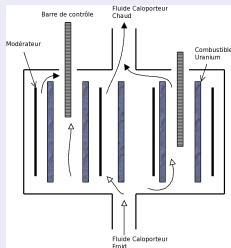
## Notion de filière : combinaison Combustible / Caloporteur / Modérateur

### Composants du cœur d'un réacteur nucléaire



- « **Combustible** » (matières fissiles et fertiles)
  - ▶ Uranium naturel (99.3%  $^{238}\text{U}$  et 0.7%  $^{235}\text{U}$ )
  - ▶ Uranium enrichi ( $^{235}\text{U} \geq 3\%$ )
  - ▶ Plutonium (Artificiel :  $^{238}\text{U} + ^1_0n \rightarrow ^{239}\text{Pu}$ )
  - ▶ Thorium (à convertir selon  $^{232}\text{Th} + ^1_0n \rightarrow ^{233}\text{U}$ )
- **Caloporteur** (évacuation de la chaleur)
  - ▶ Gaz sous pression
  - ▶ Eau lourde
  - ▶ Eau ordinaire
  - ▶ Métal liquide
  - ▶ Sel fondu
- **Modérateur** (ralentir les neutrons : favoriser les fissions)
  - ▶ Noyaux légers
  - ▶ Hydrogène (eau)
  - ▶ Deutérium (eau lourde)
  - ▶ Carbone (graphite)

## Notion de filière : combinaison Combustible / Caloporteur / Modérateur



### Composants du cœur d'un réacteur nucléaire

- « **Combustible** » (matières fissiles et fertiles)
  - ▶ Uranium naturel (99.3%  $^{238}\text{U}$  et 0.7%  $^{235}\text{U}$ )
  - ▶ Uranium enrichi ( $^{235}\text{U} \geq 3\%$ )
  - ▶ Plutonium (Artificiel :  $^{238}\text{U} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{239}\text{Pu}$ )
  - ▶ Thorium (à convertir selon  $^{232}\text{Th} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{233}\text{U}$ )
- **Caloporteur** (évacuation de la chaleur)
  - ▶ Gaz sous pression
  - ▶ Eau lourde
  - ▶ Eau ordinaire
  - ▶ Métal liquide
  - ▶ Sel fondu
- **Modérateur** (ralentir les neutrons : favoriser les fissions)
  - ▶ Noyaux légers
  - ▶ Hydrogène (eau)
  - ▶ Deutérium (eau lourde)
  - ▶ Carbone (graphite)
- **Absorbant neutronique** (contrôle de la réaction en chaîne)
  - ▶ Bore
  - ▶ Cadmium
  - ▶ Gadolinium

# Caloporteurs

	Eau légère	Sodium liquide	Gaz sous pression
Température maximale (rendement)	• (limitée par ébullition et corrosion)	••	•••
Transfert thermique (capacité calorifique et conductivité thermique)	••	•••	• (hautes pressions, fort débit ⇒ haute puissance de soufflage)
réactions avec les neutrons	• (absorption, forte modulation ⇒ neutrons lents)	•• (faible absorption, faible modulation ⇒ neutrons rapides possibles)	••• (ni absorption ni modulation) ⇒ neutrons rapides possibles)
Problèmes d'ordre technologique (corrosion, étanchéité)	• (corrosive à haute température)	•• (pas de corrosion, faibles pressions)	• (problèmes d'étanchéité)
Transparence	•••	• (opaque)	•••
Sûreté	•• (Risque de vaporisation)	• (très réactif avec l'air, l'eau, le ciment...)	•• (Risque de dépressurisation)



## Enrichissement de l'Uranium : cours de J. Foos (GE3)

Uranium naturel : 99.3% d' $^{238}_{92}\text{U}$  et 0.7% d' $^{235}_{92}\text{U}$  en masse. Enrichissement : augmentation de la teneur en  $^{235}_{92}\text{U}$

- Uranium légèrement enrichi (SEU) : 2% ;
- Uranium faiblement enrichi (LEU) : 3% à 5% ;
- Uranium hautement enrichi (HEU) : 20%, pour la propulsion navale ;
- Uranium de qualité militaire : plus de 90%.

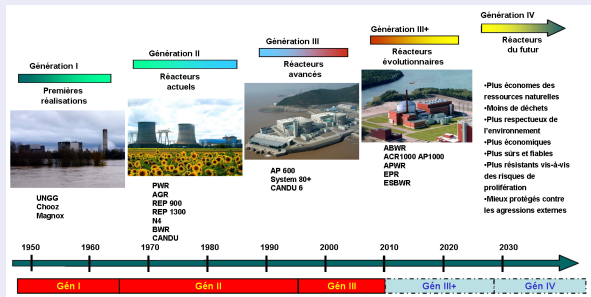
Procédés :

- Diffusion gazeuse. Première méthode déployée à échelle industrielle, énergivore, tend à disparaître ;
- Centrifugation. Réclame 50 fois moins d'énergie.

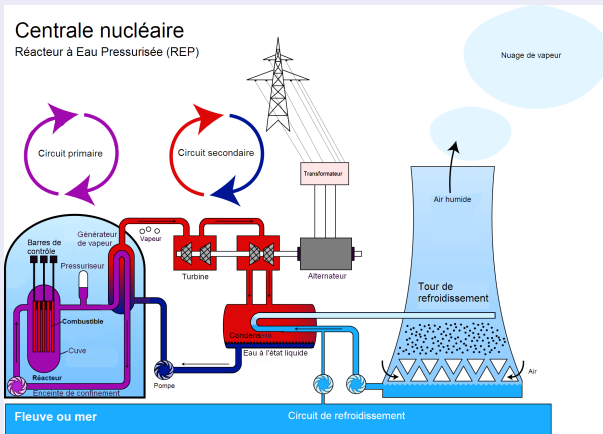
Principaux acteurs, par ordre :

- Russie ;
- Etats-Unis ;
- Allemagne/ Pays-Bas/ Royaume Uni ;
- France ;
- Chine ;
- Pakistan, Brésil, Iran, ...

# Principales filières : cours de P. Jouenne (GE3)



Filières	Combustible	Modérateur	Caloporteur	En marche (2018)		Construction (2018)		Arrêtés (1950-2018)	
				GWe	#	GWe	#	GWe	#
UNGG, Magnox	Uranium naturel	Graphite	Gaz carbonique	0	0	0	0	7.2	38
HWGCR	Uranium naturel	Eau lourde	Gaz carbonique	0	0	0	0	0.2	5
<b>CANDU</b>	Uranium naturel	Eau lourde	Eau lourde	24.5	49	2.5	4	1.9	8
RBMK	Uranium enrichi (1.8%)	Graphite	Eau bouillante	9.3	13	0	0	7.1	11
AGR	Uranium enrichi (3%)	Graphite	Gaz carbonique	7.7	14	0	0	1.9	8
<b>BWR</b>	Uranium enrichi (3%)	Eau	Eau bouillante	70.3	71	5.2	4	21.7	44
<b>PWR</b>	Uranium enrichi (3%)	Eau	Eau liquide	281.9	297	45.7	43	31.6	54
<b>FBR</b>	Uranium/Plutonium $\geq$ 10%		Sodium liquide	1.4	3	0.5	1	1.9	8
<b>Total</b>				395.2	447	54.0	53	73.0	176

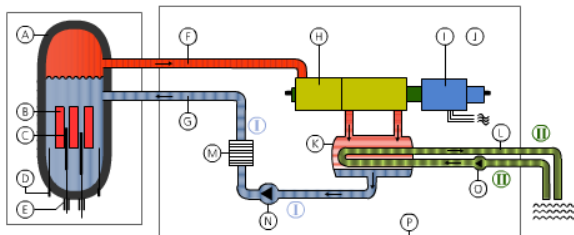


- Eau ordinaire : caloporteur et modérateur ;
- Maintenu liquide à 155 bars ;
- Générateur de vapeur, circuit secondaire.

## Réacteurs à eau bouillante

USA, Japon, Suède, Allemagne.

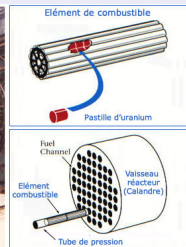
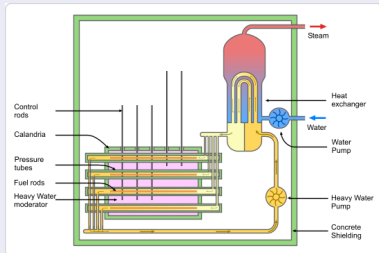
### Schéma de fonctionnement d'un réacteur à eau bouillante



- Eau ordinaire : caloporteur et modérateur ;
- Pression 80 bars, ébullition dans le cœur ;
- Détente directe. Meilleur rendement.

# CANDU

Canada, Inde, Roumanie.

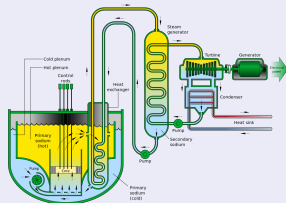
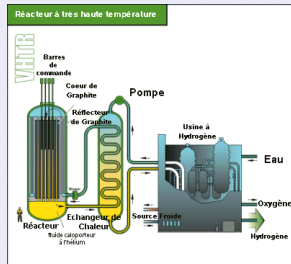


- Eau lourde : modérateur et Eau lourde sous pression dans tubes de force : caloporteur ;
- Rechargement en marche possible.

## Génération IV

Forum international, 12 pays. 6 concepts retenus :

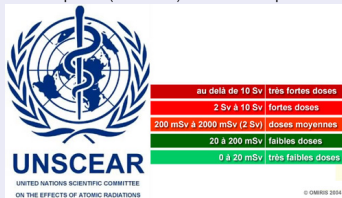
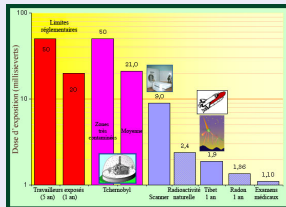
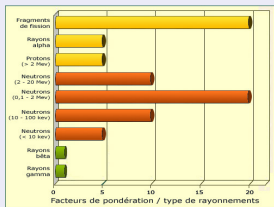
- Réacteur nucléaire à très haute température,
- Réacteur à eau supercritique,
- Réacteur nucléaire à sels fondus,
- Réacteur à neutrons rapides à caloporteur gaz,
- Réacteur à neutrons rapides à caloporteur sodium (ASTRID),
- Réacteur à neutrons rapides à caloporteur plomb.



# Interaction rayonnement matière : cours de M. Pereira (GE3) et radioprotection : cours de P. Lardon (GE3)

Grandeur	Unité	Définition	Remarque
Activité	Becquerel	1 dés. par seconde	Très petit
Dose	Gray	1 J.kg <sup>-1</sup>	indépendante type de rayonnement
Dose équivalente	Sievert	Pondération type de rayonnement	Pour le vivant
Dose efficace	Sievert	Pondération organe	Radioprotection
Débit de dose	mSv/h		

- Un litre de lait : 80 Bq
- Un humain : 8000 Bq (la moitié due au <sup>40</sup>K)
- 1 kg de minerai d'uranium : 25 × 10<sup>6</sup> Bq
- 1 g de <sup>226</sup>Ra : 37 × 10<sup>9</sup> Bq
- 1 kg de déchets nucléaires de haute activité (vieux de 50 ans), vitrifiés : 10 × 10<sup>12</sup> Bq
- combustible usé déchargé d'un réacteur par an (23 tonnes) : 10 × 10<sup>18</sup> Bq



Activité d'un échantillon contenant  $N$  noyaux radioactifs de constante de désintégration  $\lambda$  :

$$A(t) = \lambda N(t)$$

## Synoptique de votre formation

### GE2

80

Intitulé	Intervenant	heures	Ordre
Principales filières de réacteurs: historique et cartographie	Ravelet	3	1
Physique atomique	Pereira	9	2
Bases de physique nucléaire & radioactivité	Mercier	15	3
Neutronique 1	Mercier	15	4
Matériau du nucléaire 1	Braham	26	Indifférent
Energies Renouvelables	Jonquieres	12	Indifférent

### GE3

180

Intitulé	Intervenant	heures	Ordre
Interaction rayonnement/matière	Pereira	9	A
Radioprotection	Lardon	24	B
Neutronique 2	Mercier	18	1 ou 2
Technologie des REP et autres filières	Jouenne	24	2 ou 1
Sûreté des REP	Mercier	30	3
Cycle du combustible	Foos	30	Indifférent
Fabrication des chaudières nucléaires, Codes et normes	Crochon	15	Indifférent
Matériaux du nucléaire 2	Braham	30	Indifférent