



Neutronique

Introduction à la Neutronique

Module Energie Nucléaire
Classe : 3SETP
2019/2020



Walid DRIDI

M.E.N. - Neutronique - Chapitre 2

1/89

1

Notions à aborder



- **Structure de l'atome :**
- **Interactions neutrons-matière :**
 - Différents types d'interaction : absorption et diffusion,
 - Exemples et rôles en physique des réacteurs,
- **Sections efficaces :**
 - Sections efficaces microscopiques et macroscopiques,
 - Allures et ordres de grandeur des sections efficaces,
 - Résonances : aspects qualitatifs,
- **Libres parcours moyens**

Walid DRIDI

M.E.N. - Neutronique - Chapitre 2

2/89

2

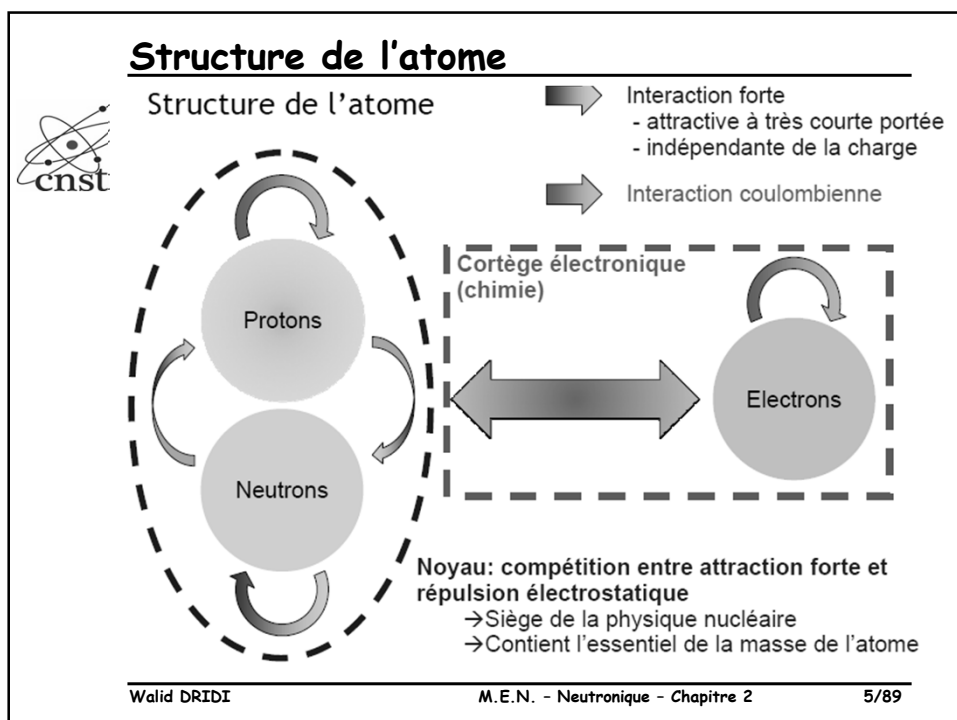
Notions à aborder (suite)



- **Les variables et grandeurs nécessaires à la description d'une population neutronique :**
 - Notion d'espace des phases,
 - Densité neutronique,
 - Flux, flux en phase et courant neutronique,
 - Taux de réaction
- **Equation-bilan de Boltzmann**



Interactions neutrons-matière



5

Structure de l'atome

Structure de l'atome, ordres de grandeur

Caractéristiques		Nucléons		Electron
		Proton	Neutron	
Charge (C)		$1,6021892 \cdot 10^{-19}$	0	$-1,6021892 \cdot 10^{-19}$
Masse	kg	$1,6726485 \cdot 10^{-27}$	$1,6749544 \cdot 10^{-27}$	$9,109534 \cdot 10^{-31}$
	m_e	1836,15	1838,68	1
Découverte		1911 (E. Rutherford)	1932 ^(*) (J. Chadwick)	1897 (J. J. Thompson)

(*) Rutherford postulait l'existence du neutron dès 1911

- Taille caractéristique du noyau $\approx 10^{-12}$ cm
- Taille caractéristique de l'atome $\approx 10^{-8}$ cm

Walid DRIDI
M.E.N. - Neutronique - Chapitre 2
6/89

6

Structure de l'atome



Structure du noyau, notations

- Les propriétés chimiques d'un élément sont caractérisées par le nombre d'électrons
 - On parle de nombre de charges Z
 - Comme les atomes sont neutres, le noyau contient Z protons

- Les propriétés nucléaires d'un élément sont caractérisées par le nombre de nucléons: il convient de distinguer les protons des neutrons
 - On note A le nombre de nucléons, on parle de nombre de masses
 - En effet l'essentiel de la masse est contenue dans le noyau
 - Ainsi, on note $N=A-Z$ le nombre de neutrons dans un noyau

- Deux éléments ayant le même nombre de charges mais deux nombres de masses différents auront les mêmes propriétés chimiques, mais pas nucléaires
 - On parle d'isotopes
 - Seul le nombre de neutrons les distingue

Walid DRIDI

M.E.N. - Neutronique - Chapitre 2

7/89

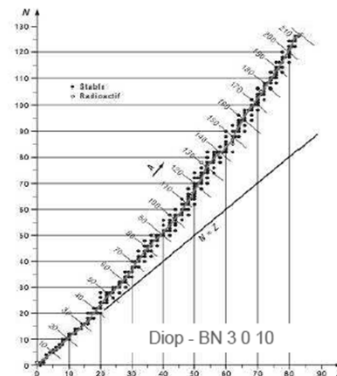
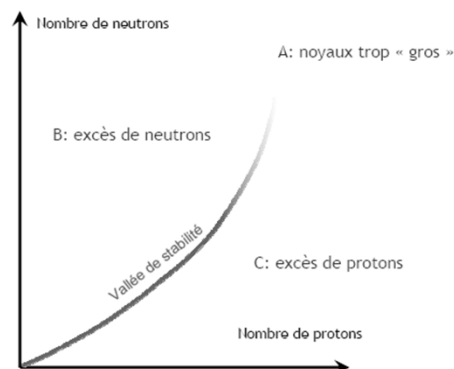
7

Structure de l'atome



Stabilité du noyau

- Certains éléments sont instables
 - S'ils sont naturellement instables, on parle de radioactivité naturelle
 - S'ils sont proches de la stabilité mais qu'une perturbation extérieure suffit à les déstabiliser, on parle de radioactivité induite



Walid DRIDI

M.E.N. - Neutronique - Chapitre 2

8/89

8

Structure de l'atome



Stabilité du noyau

- Intuitivement, le rapport entre nombre de protons et nombre de neutrons conditionne la stabilité du noyau
 - Par exemple, si la quantité de protons est « trop importante », la répulsion électrostatique entre protons tend à fragiliser le noyau
 - Cet effet est d'autant plus sensible que le noyau est gros
 - Les seuls éléments radioactifs « quasi-stables » qu'on rencontre en grande proportion dans la nature sont:
 - Thorium 232
 - Période de 14 milliards d'années (la moitié des noyaux d'un échantillon de Thorium 232 disparaît en 14 milliards d'années)
 - Uranium 235
 - Période de 710 millions d'années
 - Uranium 238
 - Période de 4,5 milliards d'années
- il est donc normal de trouver davantage d'isotope 238 dans les minerais d'Uranium naturel que d'isotope 235
- puisqu'il s'agit d'éléments « quasi-stables », on s'attend à pouvoir les déstabiliser facilement...

Walid DRIDI

M.E.N. - Neutronique - Chapitre 2

9/89

9

Structure de l'atome



Les différents modes de radioactivité

- Radioactivité: transformation de la structure nucléaire d'un élément
 - Cette transformation est contrainte par plusieurs lois de conservation:
 - Energie
 - Quantité de mouvement (impulsion)
 - Moments cinétiques (y compris le spin)
 - Nombres de masses A et nombre de charges Z
 - Cette transformation tend à augmenter la stabilité du système global
- 3 grands modes de radioactivité:

Radioactivité	Nature	Zone	Caractéristiques
α	Emission d'un noyau d'He	A	$E \approx 5\text{MeV}$, arrêté en $\approx 10\text{mm}$
β	β^- Emission d'un électron	B	$E \approx 1\text{keV}$ à 1MeV , arrêté en $\approx 1\text{mm}$ Accompagné par ν^+ ou ν^- (neutrino ou anti-neutrino)
	β^+ Emission d'un positon	C	
γ	Emission d'un photon	Toutes	$E \approx 1\text{keV}$ à 1MeV , arrêté en $\approx 10\text{cm}$ Problématiques en radioprotection

Walid DRIDI

M.E.N. - Neutronique - Chapitre 2

10/89

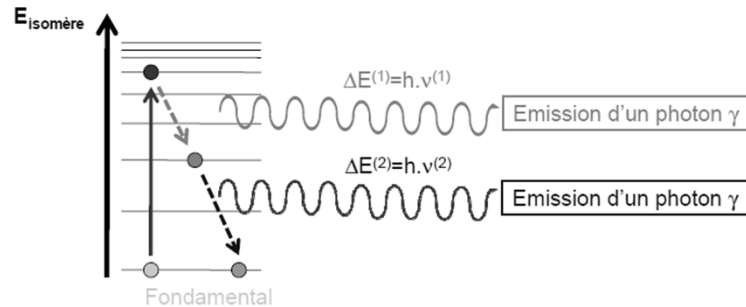
10

Structure de l'atome



Les différents modes de radioactivité

- Les noyaux obtenus après l'émission des α ou β sont dans un état excité: on parle d'isomères de l'état fondamental
 - La désexcitation passe par l'émission d'un photon γ
- Importance la structure quantique du spectre d'énergie du noyau
 - Analogue des lois de Rydberg en chimie



Walid DRIDI

M.E.N. - Neutronique - Chapitre 2

11/89

11

Structure de l'atome



Loi de la radioactivité

- Loi de la radioactivité
 - Les processus de stabilisation nucléaire (α , β , γ) sont imprévisibles et indépendants de l'âge du noyau
- Seule la probabilité de désintégration radioactive d'un noyau a un sens
 - Elle est proportionnelle à l'intervalle de temps considéré
- La constante de proportionnalité est appelée constante de décroissance radioactive, elle est notée λ
 - Caractéristique physique du noyau
 - Indépendante de la structure chimique de l'élément
 - Historiquement: une des voies pour identifier les différents isotopes
- Si on note $N(t)$ le nombre de noyaux dans un échantillon à un instant t , alors:

$$N(t+dt) = N(t) - \underbrace{\lambda \cdot dt}_{\substack{\text{Probabilité de} \\ \text{désintégration} \\ \text{d'un noyau} \\ \text{pendant } dt}} N(t) \Leftrightarrow \frac{dN}{dt} = -\lambda \cdot N(t)$$

$$\Leftrightarrow N(t) = N(0) \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

Walid DRIDI

M.E.N. - Neutronique - Chapitre 2

12/89

12

Structure de l'atome



Loi de la radioactivité

- Activité: nombre de désintégrations par unité de temps
 - $A = \lambda \cdot N$, qui s'exprime en:
 - Becquerel (Bq): 1 Bq = 1 désintégration/s
 - Curie (Ci): 1 Ci = $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq (activité d'un gramme de ^{226}Ra)
- Nombre d'Avogadro ($N_{\text{Avogadro}} = 6,023 \cdot 10^{23}$ at./mol): nombre d'atomes contenu dans 12g de ^{12}C
 - Par exemple, dans un gramme de Radium 226, on a:

$$N(0) = \frac{m \cdot N_{\text{Avogadro}}}{A} = \frac{1 \cdot 6,023 \cdot 10^{23}}{226} = 2,7 \cdot 10^{21} \text{ atomes de Radium}$$

$$\text{soit } \lambda_{^{226}\text{Ra}} = \frac{3,7 \cdot 10^{10}}{2,7 \cdot 10^{21}} \approx 1,31 \cdot 10^{-11} \text{ s}^{-1}$$

- La période radioactive (anciennement appelée demi-vie) est le temps T nécessaire à la désintégration de la moitié des atomes d'un échantillon

$$\frac{N(0)}{N(T)} = \frac{1}{e^{-\lambda T}} = \frac{1}{2} \Leftrightarrow T = \frac{\ln(2)}{\lambda} \text{ soit } T_{^{226}\text{Ra}} \approx 1600 \text{ ans}$$

Walid DRIDI

M.E.N. - Neutronique - Chapitre 2

13/89

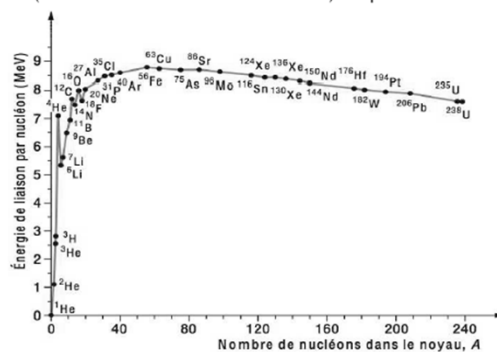
13

Structure de l'atome



Energie de liaison des noyaux

- Question fondamentale: d'où vient l'énergie des rayonnements?
- On peut tracer l'énergie à apporter à un noyau pour séparer tous ses constituants (rapportée au nombre de nucléons)
 - Cette énergie est positive (stabilité des noyaux)
 - Compétition entre répulsion coulombienne entre protons et interaction forte (très attractive à courte distance): importance du rapport Z/N



Walid DRIDI

M.E.N. - Neutronique - Chapitre 2

14/89

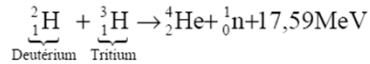
14

Structure de l'atome



Deux voies pour récupérer cette énergie de liaison

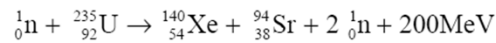
■ Réactions de fusion (projet ITER): exemple Deutérium-Tritium



- Réactions nucléaires à l'origine de la nucléosynthèse stellaire
- Problèmes industriels:
 - Vaincre la répulsion coulombienne
 - 14 MeV sont emportés par les neutrons (sous forme d'énergie cinétique): forte irradiation des installations et radioprotection complexe

■ Réactions de fission (tous les réacteurs nucléaires en exploitation)

- Vecteur principal: ${}^{235}\text{U}$ (seul élément fissile par neutrons lents)
 - Élément stable (période ≈ 710 millions d'années)
 - Fission induite par neutron thermique (ie de faible énergie)
- Exemple de réaction de fission induite sur ${}^{235}\text{U}$:



- On vérifie que les lois de conservations élémentaires sont vérifiées

Structure de l'atome



Réactions nucléaires: la fission

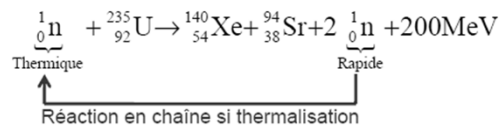
- Phénomène comparable à la combustion classique
- Les ordres de grandeur sont toutefois totalement différents:
 - $\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$ avec libération de 4 eV ($1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$)
 - ➔ domaine de la chimie
 - ➔ pour produire 1MW/an, il faut environ 1000 tonnes de carbone
 - La fission d'un atome de ${}^{235}\text{U}$ fournit 200 MeV
 - ➔ domaine de la physique nucléaire
 - ➔ pour produire 1MW/an, il faut environ 10 kg d'Uranium enrichi à 4%
- Origine de cet écart:
 - Les forces nucléaires sont très différentes des forces coulombiennes
 - Les liaisons moléculaires (coulombiennes) sont 10^6 fois plus faibles que les liaisons nucléaires (interactions fortes)

Structure de l'atome



Réactions nucléaires: la fission

- La fission peut-être auto-entretenu si le nombre de neutrons produits est suffisamment élevé pour provoquer une nouvelle fission
 - Brevet déposé par Halban Joliot, Kowarski et Perrin en mai 1939 pour un dispositif de production d'énergie
 - Description de tous les éléments de base d'un réacteur nucléaire (combustible, modérateur, absorbant)
- Principe de la réaction en chaîne:
 - La fission de l'Uranium par un neutron thermique (ie de faible énergie) libère 2-3 neutrons en moyenne
 - Ces neutrons sont très énergétiques: si ils peuvent être ralentis sans être absorbés ou perdus hors du réacteur, ils pourront donner lieu à de nouvelles fissions



Walid DRIDI

M.E.N. - Neutronique - Chapitre 2

17/89

17

Structure de l'atome



Réactions nucléaires: la fission

- On appelle k le facteur de multiplication de la réaction en chaîne
 - C'est nombre de fissions induites par les neutrons issus d'une fission initiale
 - Progression géométrique:

$$N \rightarrow N.k \rightarrow N.k^2 \rightarrow N.k^3 \rightarrow \dots \rightarrow N.k^n$$

- $k < 1$: réacteur sous-critique (diminution de l'énergie produite)
- $k = 1$: réacteur critique
- $k > 1$: réacteur sur-critique (augmentation de l'énergie produite)

- Le facteur de multiplication k tient compte des fuites hors réacteurs

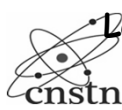
$$k = \underbrace{k_{\infty}}_{\text{Facteur de multiplication en milieu infini}} \cdot \underbrace{T_{\text{fuites}}}_{\text{Taux de fuites}}$$

Walid DRIDI

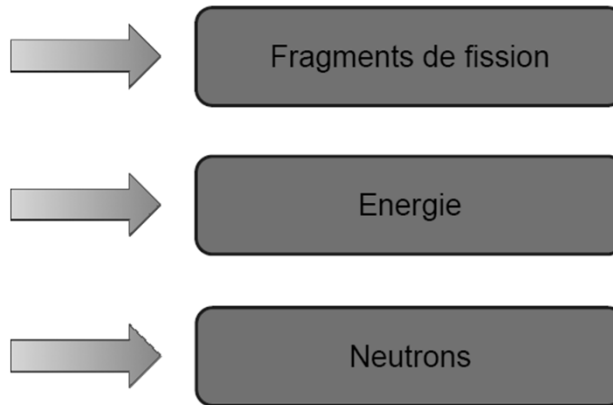
M.E.N. - Neutronique - Chapitre 2

18/89

18



Les produits de fission: 3 grandes catégories



Walid DRIDI

M.E.N. - Neutronique - Chapitre 2

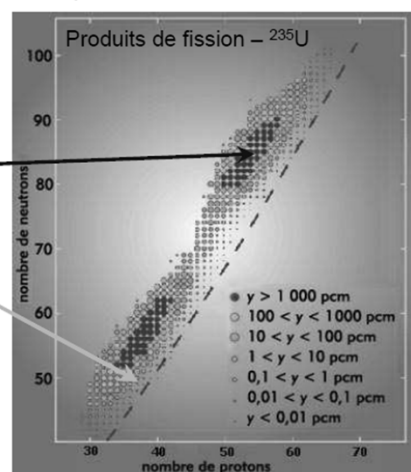
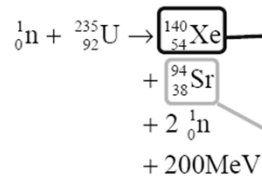
19/89

19

Les produits de fission: les fragments de fission



■ La réaction précédente n'est pas la seule possible:



Walid DRIDI

M.E.N. - Neutronique - Chapitre 2

20/89

20

Les produits de fission: les fragments de fission



- La génération des fragments de fission est un phénomène complexe
 - On dénombre plus de 200 produits de fission dans un réacteur!
- A retenir:
 - Les fragments de fission sont le plus souvent émis par paires
 - Les fragments sont en général instables et le plus souvent β -radioactifs

Les produits de fission: l'énergie



- L'énergie libérée par la fission se décompose en plusieurs postes:

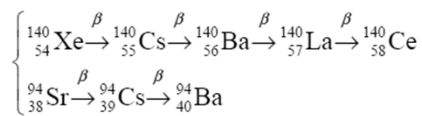
Poste	Energie (MeV)	Fraction	Dissipation
Fragments de fission	166,2	79%	Combustible (libre parcours de l'ordre de 7 μ m)
Photons γ	15,2	7%	Combustible (essentiellement)
Neutrons	4,8	2%	Modérateur (thermalisation)
Particules β	7,0	3%	Combustible
Neutrinos	9,6	5%	Perdue
Photons γ	8,4	4%	Combustible (essentiellement)
Total	211,2		Energie totale
Total effectif	201,6		Energie récupérable

- Une partie du rayonnement γ est directement transmise au modérateur (1,9% ou 2,6% sont les valeurs traditionnellement rencontrées)

Les produits de fission: l'énergie



- Les fragments de fissions ne sont généralement pas nécessairement stables
- Les noyaux peuvent retrouver leur stabilité via plusieurs processus (complexes):
 - Emission de photons γ
 - Emission d'un ou plusieurs neutrons: concerne moins de 1% des fragments
 - On parle de neutrons retardés
 - Rôle fondamental dans la cinétique des réacteurs
- Les autres produits de fission se stabilisent par décroissance β^- :
 - Les noyaux formés ont globalement un excès de neutrons
 - Cette décroissance peut s'interpréter comme la transformation d'un neutron en une paire proton+électron (conservation de la charge), l'électron étant expulsé du noyau



Walid DRIDI

M.E.N. - Neutronique - Chapitre 2

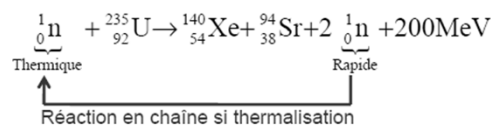
23/89

23

Les produits de fission: les neutrons



- En moyenne, 2,4 neutrons sont émis par fission
- Remarque: l'énergie emportée par les neutrons est en moyenne 4,8 MeV, soit environ 2 MeV par neutron
 - La fission de ${}^{235}\text{U}$ est possible uniquement avec des neutrons beaucoup moins énergétiques ($\approx \text{eV}$)
 - Rappel: il est nécessaire que les neutrons émis au moment de la fission perdent de l'énergie pour pouvoir entretenir la réaction en chaîne
 - On parle de thermalisation des neutrons



- On distingue deux types de neutrons:
 - Neutrons prompts: émis en même temps que la fission
 - Neutrons retardés: émis avec un certain retard

Walid DRIDI

M.E.N. - Neutronique - Chapitre 2

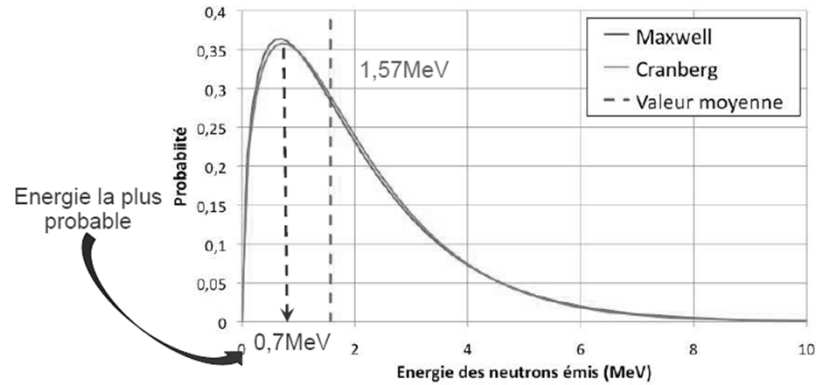
24/89

24

Les produits de fission: les neutrons prompts



- Largement majoritaires: 99,3% pour ^{235}U et 99,8% pour ^{239}Pu
 - Emis très rapidement
 - Spectre d'énergie compris entre 0 et 10 MeV
 - Approximations analytiques du spectre: Maxwell, Cranberg par exemple



Walid DRIDI

M.E.N. - Neutronique - Chapitre 2

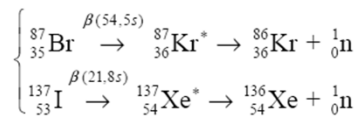
25/89

25

Les produits de fission: les neutrons retardés



- Faible proportion: 0,7% pour ^{235}U et 0,2% pour ^{239}Pu
 - Légèrement moins énergétiques que les neutrons prompts (0,2 à 0,6 MeV)
 - Rôle fondamental en physique des réacteurs: sans neutrons retardés, pas de pilotage possible
 - Plusieurs centaines de processus d'émission des neutrons retardés, par exemple:



- Faible proportion, mais délai d'émission très important!

Walid DRIDI

M.E.N. - Neutronique - Chapitre 2

26/89

26

Les produits de fission: les neutrons retardés



- Les neutrons retardés sont en général regroupés en 6 groupes
 - Un groupe correspond à un précurseur (=isotope) radioactif
 - En général, on regroupe plusieurs isotopes dans un même groupe, les propriétés du groupes étant alors la « moyenne » des isotopes
- Chaque groupe est caractérisé par:
 - Constante radioactive λ_i (en s^{-1})
 - Fraction β_i (en pcm)
 - Pour cent milles neutrons émis, β_i sont émis suite à la décroissance radioactive du précurseur i , la constante de décroissance associée étant donnée par λ_i
 - Le nombre total de neutrons retardés est simplement donné par:

$$\beta = \sum_{i=1}^6 \beta_i$$

Les produits de fission: les neutrons retardés



- Fractions de neutrons retardés pour quelques noyaux (Reuss)

Noyau	Fission	β (pcm)	β_{eff} (pcm)
Uranium 235	Thermique	679	659
Uranium 238	Rapide	1828	1773
Thorium 232	Rapide	2433	2360
Plutonium 239	Thermique	224	217



Eléments de physique nucléaire - Résumé

Structure du noyau

Z protons – N neutrons
Nombre de masse: $A=N+Z$
Quantification des niveaux d'énergie

3 grands modes de radioactivité

α : émission d'un noyau d'Helium
 β : émission d'une paire électron/neutrino
 γ : émission d'un photon

Fission de l'Uranium

→ Produits de fission émis par paire
→ Energie libérée: $\approx 200\text{MeV}$
→ Neutrons émis: prompts et retardés (en moyenne 2,4 par fission)

Walid DRIDI

M.E.N. - Neutronique - Chapitre 2

29/89

29

Interactions neutrons/matière



Neutronique: étude du cheminement des neutrons dans la matière et des réactions qu'ils y induisent, en particulier la génération de puissance par fission des noyaux d'atomes lourds
«La neutronique»-Paul Reuss -Que sais-je?

- En neutronique, les interactions neutrons/matière se résument aux interactions neutrons/noyaux :
 - ✓ Les neutrons ne « voient » pas les électrons,
 - ✓ La densité neutronique est telle que la probabilité d'une rencontre neutron/neutron est faible.
- Une faible part des atomes d'un réacteur est concernée par ces interactions.

Walid DRIDI

M.E.N. - Neutronique - Chapitre 2

30/89

30

Différents types d'interactions



- En neutronique, on distingue deux types d'interactions entre neutrons et noyaux :
 - ✓ Les DIFFUSIONS (scattering) : qui ne font pas disparaître le neutron,
 - ✓ Les ABSORPTIONS : qui le font disparaître.
- A l'intérieur des absorptions, on distingue essentiellement :
 - ✓ La fission,
 - ✓ La capture ou capture stérile.

Walid DRIDI

M.E.N. - Neutronique - Chapitre 2

31/89

31

Différents types d'interaction (2)



- Les interactions jouant un rôle important en physique des réacteurs sont plus précisément :
 - ✓ Les DIFFUSIONS, qui permettent le ralentissement des neutrons,
 - ✓ La CAPTURE RADIATIVE (émission d'un ou plusieurs photons), utile pour le contrôle des réacteurs,
Exemple :
$${}_0^1\text{n} + {}_{48}^{113}\text{Cd} \rightarrow {}_{48}^{114}\text{Cd} + \gamma$$
 - ✓ La FISSION, si l'énergie d'excitation est suffisante :
 - A toute énergie pour les noyaux ${}^{233}\text{U}$, ${}^{235}\text{U}$, ${}^{239}\text{Pu}$,...
 - Au delà d'un seuil d'environ 1 MeV pour ${}^{232}\text{Th}$, ${}^{240}\text{Pu}$,...

Walid DRIDI

M.E.N. - Neutronique - Chapitre 2

32/89

32



Sections efficaces et libres parcours moyens

33

Sections efficaces



- **En neutronique**, la donnée fondamentale est celle de l'ensemble des probabilités d'interactions des neutrons avec les différents noyaux de la matière,
- Ce sont les **sections efficaces** qui caractérisent ces différentes probabilités,
- **Conséquence importante** : grandeurs permettant, lorsqu'un grand nombre de neutrons est en jeu, de calculer les nombres **moyens** d'interactions.

34

Sections efficaces (2)



- Il existe deux types de sections efficaces.
- **Sections efficaces microscopiques (notées σ) :**
 - ✓ Caractérisent l'interaction entre un neutron et un noyau,
 - ✓ S'expriment en cm^2 ou, plus adapté, en barn ($=10^{-24} \text{ cm}^2$),
- **Sections efficaces macroscopiques (notées Σ) :**
 - ✓ Caractérisent l'interaction entre un neutron et un milieu,
 - ✓ S'expriment en cm^{-1} ,

Sections efficaces (3)



- Sections efficaces macroscopique et microscopique sont liées par une relation de proportionnalité :

$$\Sigma = N\sigma$$

faisant intervenir la densité (n/cm^3) de ces noyaux dans le milieu, qui s'exprime par :

$$N = \frac{\rho}{A} \mathcal{N}$$

Sections efficaces (4)



- σ (resp. Σ) représente la section efficace totale qui regroupe tous les types d'interaction.
- En distinguant les types d'interaction, on définit des sections efficaces partielles σ_r (resp. Σ_r) au prorata des probabilités respectives de ces interactions.

⇒ Si une interaction quelconque se produit, la probabilité qu'elle soit du type r , sera : $\frac{\sigma_r}{\sigma}$

Sections efficaces (5)



- Les sections efficaces microscopiques d'un même noyau s'ajoutent, SI on considère une somme de réactions dont les probabilités sont indépendantes :

- Ainsi :

$$\sigma_t = \sigma_a + \sigma_s$$

- Et :

$$\sigma_a = \sigma_c + \sigma_f$$

Sections efficaces (6)



- Les sections efficaces macroscopiques d'un matériau ne comportant qu'un seul type de noyaux s'ajoutent de même :

$$\Sigma_t = \Sigma_a + \Sigma_s \quad \text{et} \quad \Sigma_a = \Sigma_c + \Sigma_f$$

- Tandis que pour un mélange de noyaux différents, il faut sommer les probabilités d'interaction avec chacun des types de noyaux du milieu :

$$\Sigma = \Sigma_1 + \Sigma_2 = N_1 \sigma_1 + N_2 \sigma_2$$

Walid DRIDI

M.E.N. - Neutronique - Chapitre 2

39/89

39

Application #1



- Calcul du nombre d'atomes dans U_{METAL} et UO_2

Données

$$U_{\text{METAL}} : d^{\text{té}} = 17 \text{ g/cm}^3$$

$$UO_2 : d^{\text{té}} = 10.3 \text{ g/cm}^3$$

$$N \approx 6.02 \cdot 10^{23}$$

Dans U on trouve $\approx 0.7\%$ d' U^{235}
 99.3% d' U^{238}

Walid DRIDI

M.E.N. - Neutronique - Chapitre 2

40/89

40

Application #1 - Correction



• A utiliser :
$$N = \frac{\rho}{A} \mathcal{N}$$

➤ U_{METAL} : ✓ $A \approx 238$ (en négligeant 0.7% d' U_{235})

✓ densité de 17 g/cm^3

⇒ $N_{U_{\text{métal}}} \approx 4.3 \cdot 10^{22} \text{ at./cm}^3$

➤ UO_2 : ✓ $A \approx 238 + 2 \times 16 = 270$ (même remarque)

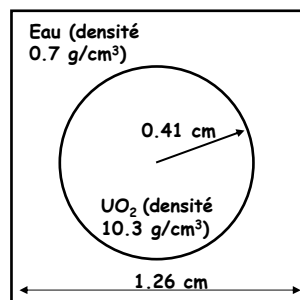
✓ densité de 10.3 g/cm^3

⇒ $N_{UO_2} \approx 2.3 \cdot 10^{22} \text{ moléc./cm}^3$

Application #2



- Calcul des sections efficaces macroscopiques
(combustible et modérateur) d'une cellule REP à 3.5%
d' ^{235}U :



Données

^{235}U : $\sigma_a = 680 \text{ b}$
 $\sigma_f = 580 \text{ b}$

^{238}U : $\sigma_a = 2.7 \text{ b}$

H : $\sigma_a = 0.32 \text{ b}$

O : $\sigma_a \neq 0 \text{ b}$

Application #2 - Correction



- Calcul des densités d'atomes :

- **Modérateur** : ✓ $N_{\text{eau}} = (0.7/18) \times 6.02 \times 10^{23}$
⇒ $N_{\text{eau}} \approx 2.35 \times 10^{22} \text{ moléc./ cm}^3$

- **Combustible** : ✓ $N_{\text{comb}} = N_{\text{UO}_2}$
✓ $N_5 = N_{\text{comb}} \times e_{\text{U5}}$
✓ $N_8 = N_{\text{comb}} \times (1 - e_{\text{U5}})$
⇒ $N_5 \approx 8.05 \times 10^{20} \text{ at./ cm}^3$
⇒ $N_8 \approx 2.22 \times 10^{22} \text{ at./ cm}^3$

Application #2 - Correction (2)



- Sections efficaces d'absorption :

- **Modérateur** : ✓ $\Sigma_{a_{\text{mod}}} = \Sigma_{a_{\text{eau}}} (+\text{éventuellement } \Sigma_{a_{\text{bore}}})$
✓ $\approx N_H \times \sigma_{a_H}$ (puisque $\sigma_{a_O} \approx 0$)
✓ $\Sigma_{a_{\text{mod}}} \approx 2 \times N_{\text{eau}} \times \sigma_{a_H}$

- **Combustible** : ✓ $\Sigma_{a_{\text{comb}}} = \Sigma_{a_{\text{U5}}} + \Sigma_{a_{\text{U8}}}$
✓ $\Sigma_{a_{\text{U5}}} = N_5 \times \sigma_{a_{\text{U5}}}$ et $\Sigma_{a_{\text{U8}}} = N_8 \times \sigma_{a_{\text{U8}}}$

- **Section efficace de fission** : $\Sigma_{f_{\text{comb}}} = \Sigma_{f_{\text{U5}}} = N_5 \times \sigma_{f_{\text{U5}}}$

Application #2 - Correction (3)



- **Applications numériques :**

- **Modérateur :** $\Rightarrow \Sigma_{a_{\text{mod}}} = \Sigma_{a_{\text{eau}}} \approx 0.015 \text{ cm}^{-1}$

- **Combustible :** ✓ $\Sigma_{a_{U5}} \approx 0.55 \text{ cm}^{-1}$

- ✓ $\Sigma_{a_{U8}} \approx 0.060 \text{ cm}^{-1}$

- $\Rightarrow \Sigma_{a_{\text{comb}}} \approx 0.61 \text{ cm}^{-1}$

- $\Rightarrow \Sigma_{f_{\text{comb}}} \approx 0.47 \text{ cm}^{-1}$

Allures des sections efficaces



- **Les sections efficaces peuvent être données :**

- en moyenne, par rapport à l'énergie des particules incidentes,
- ponctuellement, en fonction de cette énergie.

- Dans ce second cas, les allures observées peuvent être expliquées dans le cadre du modèle du noyau composé (bien adapté à la description des interactions avec la matière de neutrons de qq MeV).

Allures des sections efficaces (4)



- Pour la gamme d'énergie rencontrée dans les réacteurs (de 0 à qq MeV) :

➤ Les noyaux lourds présenteront de nombreuses résonances,



➤ Les noyaux légers en seront pratiquement dépourvus.



Walid DRIDI

M.E.N. - Neutronique - Chapitre 2

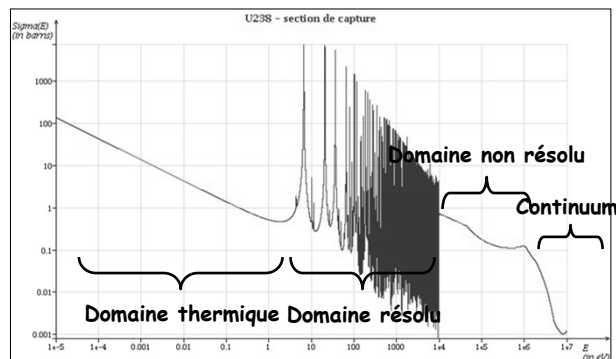
47/89

47

Allures des sections efficaces (5)



- Section efficace de capture de l' ^{238}U :



Walid DRIDI

M.E.N. - Neutronique - Chapitre 2

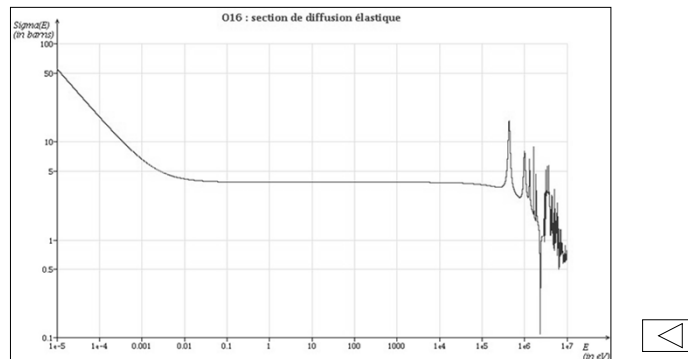
48/89

48

Allures des sections efficaces (6)



- Section efficace de diffusion de l'Oxygène-16 :



Walid DRIDI

M.E.N. - Neutronique - Chapitre 2

49/89

49

Allures des sections efficaces (7)



- On observe de grandes différences entre sections efficaces de diffusion et d'absorption.
- Pour les sections de diffusion, on observe :
 - De faibles variations en fonction de l'énergie,
 - Pratiquement le même ordre de grandeur (1 à 10 barns) pour tous les noyaux, à l'exception de l'hydrogène qui présente une section plus élevée (environ 20 barns).

Walid DRIDI

M.E.N. - Neutronique - Chapitre 2

50/89

50

Allures des sections efficaces (8)



- Tandis que pour les sections d'absorption, on a :

- De fortes variations d'un noyau à l'autre,
- De nombreuses résonances,
- Un comportement général « en $1/v$ » en dehors des résonances, avec un cas particulier pour le Bore-10,



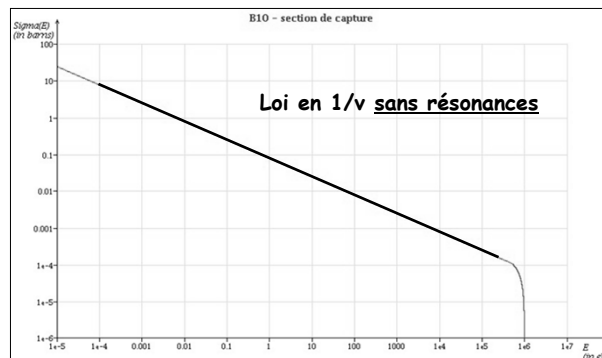
- Généralement synthétisées par la donnée de la section à 2200 m/s et de l'intégrale de résonance.



Allures des sections efficaces (9)



- Section efficace de capture du Bore-10 :



Allures des sections efficaces (10)



- Ordres de grandeur de sections efficaces d'absorption (valeurs à 2200 m/s, en barns) :

Noyau ou élément	Section efficace
Hydrogène naturel	0,332
Deutérium	0,000506
Béryllium naturel	0,0076
Bore 10	3840
Carbone naturel	0,00333
Oxygène naturel	0,000281
Zirconium naturel	0,184
Xénon 135	2640000
Gadolinium naturel	48800
Samarium 149	40100
Plomb naturel	0,179

10 décades

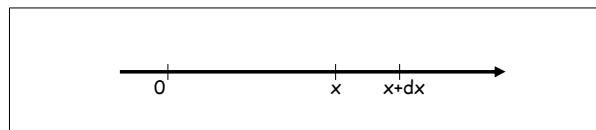
Walid DRIDI

M.E.N. - Neutronique - Chapitre 2

53/89

53

Libres parcours moyens



- La probabilité, pour un neutron, de subir une interaction sur un parcours élémentaire dx , est (par "définition") :

$$\Sigma dx$$

- On peut en déduire la probabilité de parcourir une distance x sans choc :

$$e^{-\Sigma dx}$$

Walid DRIDI

M.E.N. - Neutronique - Chapitre 2

54/89

54

Libres parcours moyens (2)



- La probabilité de première interaction entre x et $x+dx$ est, par conséquent :

$$P(x)dx = e^{-\Sigma dx} \times \Sigma dx$$

- Ce qui permet de calculer la distance moyenne parcourue avant interaction comme :

$$\lambda = \langle x \rangle = \frac{\int_0^{\infty} xP(x)dx}{\int_0^{\infty} P(x)dx}$$

Walid DRIDI

M.E.N. - Neutronique - Chapitre 2

55/89

55

Libres parcours moyens (3)



- On a donc :

$$\lambda = \langle x \rangle = \frac{\int_0^{\infty} xe^{-\Sigma x} \times \Sigma dx}{\int_0^{\infty} e^{-\Sigma x} \times \Sigma dx}$$

- Ce qui conduit à :

$$\lambda = \frac{1}{\Sigma}$$

Walid DRIDI

M.E.N. - Neutronique - Chapitre 2

56/89

56

Libres parcours moyens (4)



- λ , inverse de la section efficace macroscopique, est appelé libre parcours moyen. Unité le cm.
- On peut définir un libre parcours moyen pour chaque type d'interaction possible :
Par exemple : $\lambda_a = \frac{1}{\Sigma_a}$ ou $\lambda_s = \frac{1}{\Sigma_s}$
- **Attention** : Ce sont les inverses des libres parcours moyens qui sont additifs.

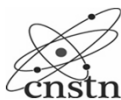
Walid DRIDI

M.E.N. - Neutronique - Chapitre 2

57/89

57

Application #3



- Calcul des libres parcours moyens de diffusion et d'absorption d'un neutron de vitesse 2200 m/s dans du graphite.

Données

Graphite : $\sigma_a = 3.4 \text{ mb}$
 $\sigma_s = 4.8 \text{ b}$
 $\rho = 1.6 \text{ g/cm}^3$

Walid DRIDI

M.E.N. - Neutronique - Chapitre 2

58/89

58

Application #3 - Correction



• A utiliser :

$$\lambda = \frac{1}{\Sigma}$$

➤ **Calculs des sections efficaces :**

✓ $\Sigma_{a_{\text{Graphite}}} \approx 0.00027 \text{ cm}^{-1}$

✓ $\Sigma_{s_{\text{Graphite}}} \approx 0.385 \text{ cm}^{-1}$

Plus de 1300
diffusions avant
l'absorption !!!

➤ **Calculs des libres parcours :**

⇒ $\lambda_{a_{\text{Graphite}}} \approx 36.6 \text{ m}$

⇒ $\lambda_{s_{\text{Graphite}}} \approx 2.6 \text{ cm}$



Description d'une population neutronique

Notion d'espace des phases



- En physique des réacteurs, les populations de neutrons font l'objet d'un traitement statistique,
- On les décrits en faisant appel à la notion de densité neutronique, qui représente le nombre moyen de neutrons observé par unité de « volume ».
- Cette densité neutronique à considérer est cependant une notion plus générale que la notion de densité usuelle...

Notion d'espace des phases (2)



- ... car le volume élémentaire à considérer n'est pas seulement un volume dans l'espace physique...
- Il faut en effet décompter les neutrons non seulement dans l'espace mais aussi selon leur vitesse, qui n'est pas la même pour tous et qui joue un rôle fondamental sur leur devenir.
- Autre différence : cette densité est également (dans le cas général) fonction du temps.

Notion d'espace des phases (3)



- Au total, pour décrire complètement une population de neutrons, il faut donc (dans le cas général) faire intervenir :
 - Trois variables d'espace → position
 - Trois variables de vitesse → état
 - La variable temps
- 7 variables distinctes sont donc nécessaires.

Notion d'espace des phases (4)



- A noter : dans la pratique, les matériaux utilisés dans les réacteurs sont isotropes.
 - ⇒ Leur propriétés (leurs sections efficaces) ne dépendent alors que du module de la vitesse (ou de l'énergie) des neutrons incidents et pas de leur direction.
- C'est pourquoi, on distingue souvent module de la vitesse et direction des neutrons.

Notion d'espace des phases (5)



- Cette distinction est réalisée en introduisant le vecteur unitaire (bâti sur le vecteur vitesse) :

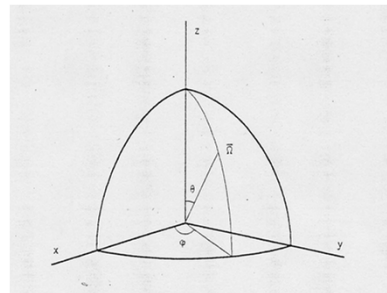
$$\vec{\Omega} = \frac{\vec{v}}{v}$$

Repéré par deux angles :

La longitude φ et
la colatitude θ

Variation élémentaire :

$$d^2\Omega = \sin\theta.d\theta.d\varphi$$



Walid DRIDI

M.E.N. - Neutronique - Chapitre 2

65/89

65

Notion d'espace des phases (6)



- Au final, la densité (qualifiée de densité en phase) doit être rigoureusement notée :

$$n(\vec{r}, v, \vec{\Omega}, t)$$

- Elle permet d'exprimer le nombre moyen de neutrons compris, à l'instant t, dans un volume élémentaire d'un espace à 6 dimensions appelé l'espace des phases :

$$n(\vec{r}, v, \vec{\Omega}, t) d^3r dv d^2\Omega$$

Walid DRIDI

M.E.N. - Neutronique - Chapitre 2

66/89

66

Flux et flux en phase



- Le flux neutronique est défini comme le produit de la densité neutronique par la vitesse des neutrons :

$$\phi(\vec{r}, v, \vec{\Omega}, t) = v.n(\vec{r}, v, \vec{\Omega}, t)$$

- Il s'exprime en neutrons/cm².s
- Remarque importante : malgré sa dimension, ce flux, défini à partir de la notion de densité volumique, n'est pas un flux usuel.

Walid DRIDI

M.E.N. - Neutronique - Chapitre 2

67/89

67

Flux et flux en phase (2)



- Lorsqu'on fait la distinction des directions, on parle (comme pour la densité) de flux en phase :

$$\phi(\vec{r}, v, \vec{\Omega}, t)$$

- Si l'on considère tous les neutrons au point r , indépendamment de leur direction, il suffit d'intégrer :

$$\phi(\vec{r}, v, t) = \int_{4\pi} \phi(\vec{r}, v, \vec{\Omega}, t) d^2\Omega$$

- On parle alors de flux scalaire ou plus simplement de flux.

Walid DRIDI

M.E.N. - Neutronique - Chapitre 2

68/89

68

Flux et flux en phase (3)



- De la même manière, on peut exprimer le flux total en un point, indépendamment de la vitesse (de l'énergie) des neutrons, par intégration :

$$\phi(\vec{r}, t) = \int_0^{\infty} \phi(\vec{r}, v, t) dv$$

- A noter : on peut de même définir une densité intégrée par rapport aux directions, ou une densité totale :

$$n(\vec{r}, t) = \int_0^{\infty} n(\vec{r}, v, t) dv$$

Walid DRIDI

M.E.N. - Neutronique - Chapitre 2

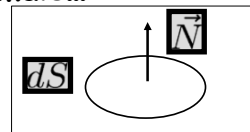
69/89

69

Notion de courant neutronique



- On définit le courant neutronique comme le nombre de neutrons traversant une surface unité par seconde.
- Attention : ce courant s'apparente donc à un flux dans les autres disciplines de la Physique.
- On peut établir son expression en considérant un élément de surface muni d'une normale...



Walid DRIDI

M.E.N. - Neutronique - Chapitre 2

70/89

70

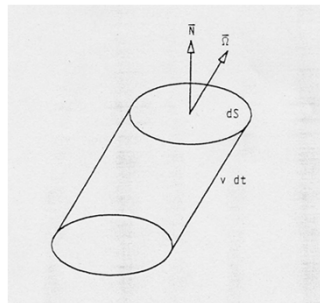
Notion de courant neutronique (2)



- ...et en cherchant le nombre de neutrons traversant cette surface pendant un temps élémentaire dt .
- Or, les neutrons concernés sont ceux contenus dans le cylindre élémentaire :
- Par définition de la densité, leur nombre est donc :

$$n(\vec{r}, v, \vec{\Omega}, t) dS v dt \vec{\Omega} \cdot \vec{N}$$

Volume du cylindre



Walid DRIDI

M.E.N. - Neutronique - Chapitre 2

71/89

71

Notion de courant neutronique (3)



- En ramenant cette quantité à l'unité de surface et à l'unité de temps, on a un nombre :

$$v.n(\vec{r}, v, \vec{\Omega}, t) \vec{\Omega} \cdot \vec{N}$$

- Ce que l'on peut également écrire : $\vec{J}(\vec{r}, v, \vec{\Omega}, t) \cdot \vec{N}$

- En introduisant le vecteur :

$$\vec{J}(\vec{r}, v, \vec{\Omega}, t) = \vec{\Omega} \cdot \phi(\vec{r}, v, \vec{\Omega}, t)$$

que l'on appelle le vecteur courant.

Walid DRIDI

M.E.N. - Neutronique - Chapitre 2

72/89

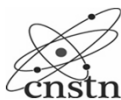
72

Notion de courant neutronique (4)



- Par définition, le produit scalaire $\vec{J} \cdot \vec{N}$ indique le nombre de neutrons traversant, par unité de temps, l'élément de surface d'aire unité.
- C'est ce que l'on appelle le courant en neutronique.
- A noter : ce nombre de neutrons est positif SI les neutrons traversent dans le sens de la normale, négatif sinon.

Notion de courant neutronique (5)



- On définit aussi les courants intégrés sur la phase :

dans le sens de la normale :

$$J_+(\vec{r}, v, t) = \int_{0 < \theta < \pi/2} \vec{J}(\vec{\Omega}) \cdot \vec{N} d^2\Omega$$

dans l'autre sens :

$$J_-(\vec{r}, v, t) = - \int_{\pi/2 < \theta < \pi} \vec{J}(\vec{\Omega}) \cdot \vec{N} d^2\Omega$$

- Ainsi que le courant net : $J_{NET} = J_+ - J_-$
- Attention : ces grandeurs sont des scalaires.

Taux de réaction



- **Définition du taux de réaction :**
C'est le nombre de neutrons subissant la réaction considérée par unité de temps et par unité de volume.
- Or, dans un milieu parcouru par des neutrons de densité n et de vitesse v , la probabilité pour ces neutrons de subir une réaction r donnée pendant le temps élémentaire dt , vaut :

$$\Sigma_r dx = \Sigma_r v dt$$

Taux de réaction (2)



- Le nombre de réactions observé (neutrons de toutes directions) dans le milieu pendant dt sera donc :

$$n(\vec{r}, v, t) \Sigma_r v d^3r dv dt$$

- Et le taux de réaction sera par conséquent la grandeur :

$$R_r = n(\vec{r}, v, t) \Sigma_r v$$

Taux de réaction (3)



- On peut regrouper les différents types de réactions pour définir le taux de réaction total :

$$R = n(\vec{r}, v, t) \Sigma v$$

- On peut aussi reformuler ces expressions en utilisant le flux neutronique :

$$R = \Sigma \phi(\vec{r}, v, t) \quad \text{et} \quad R_r = \Sigma_r \phi(\vec{r}, v, t)$$

- Important : les taux de réaction sont des grandeurs fondamentales car mesurables.



Equation-bilan de Boltzmann

Equation-bilan de Boltzmann



- L'équation qui régit le comportement de la population de neutrons est obtenue par bilan, entre les instants t et $t+dt$, de la variation du nombre des neutrons contenus dans l'intervalle élémentaire des autres variables $d^3r dv d^2\Omega$.
- C'est l'équation du transport des neutrons qu'on appelle aussi équation de Boltzmann.

Equation-bilan de Boltzmann (2)



- Premier membre : variation élémentaire du nombre de neutrons entre t et $t+dt$:

$$\frac{\partial}{\partial t} n(\vec{r}, v, \vec{\Omega}, t)$$

Ou encore :



$$\frac{1}{v} \frac{\partial}{\partial t} \phi(\vec{r}, v, \vec{\Omega}, t)$$

Equation-bilan de Boltzmann (3)





- Second membre : contributions à ce bilan.

- Contributions négatives* :

- ✓ Un terme traduisant les chocs, 
- ✓ Un terme traduisant les déplacements. 

- Contributions positives :

- ✓ Un terme traduisant les sources (fission,...), 
- ✓ Un terme traduisant les transferts. 

Equation-bilan de Boltzmann (4)



- Terme « chocs » :

- Correspond aux sorties de neutrons de l'intervalle élémentaire par chocs.
- Tous les types de chocs étant concernés, il fait intervenir la section efficace totale :

$$-\Sigma_{\dagger}(\vec{r}, v, \vec{\Omega}, t) \phi(\vec{r}, v, \vec{\Omega}, t)$$



Equation-bilan de Boltzmann (5)



- **Terme « déplacements » :**

- Correspond aux disparitions de neutrons par déplacements (ou fuites).
- Il est lié à la notion de courant neutronique,
- On admettra pour le moment que son expression est :

$$- \text{div}[\vec{\Omega} \cdot \phi(\vec{r}, v, \vec{\Omega}, t)]$$



Equation-bilan de Boltzmann (6)



- **Terme « sources » :**

- Traduit la possible « création » de neutrons dans l'intervalle considéré par :
 - ✓ Fissions,
 - ✓ Source extérieure le cas échéant.

- Son expression est :

$$+ S(\vec{r}, v, \vec{\Omega}, t)$$



Equation-bilan de Boltzmann (7)



• Terme « transferts » :

- Correspond aux arrivées de neutrons dans l'intervalle considéré par transferts depuis les autres intervalles,
- S'apparente aux sorties par chocs mais ne concerne que les diffusions,
- Fait intervenir la section efficace différentielle de diffusion :

$$\Sigma_s(\vec{r}, (v', \vec{\Omega}') \rightarrow (v, \vec{\Omega}), t)$$

Equation-bilan de Boltzmann (8)



➤ Son expression est :

$$+ \int_{4\pi} d\vec{\Omega}' \int_0^\infty dv' \left[\Sigma_s(\vec{r}, (v', \vec{\Omega}') \rightarrow (v, \vec{\Omega}), t) \phi(\vec{r}, v', \vec{\Omega}', t) \right]$$

Section efficace différentielle de diffusion

➤ Remarques :

- ✓ On appelle parfois ce terme l'opérateur de diffusion.
- ✓ On appelle alors la somme des contributions positives (transferts+sources) l'opérateur d'émission.



Equation-bilan de Boltzmann (9)



- Au final, l'équation-bilan est :

$$\begin{aligned} \frac{1}{v} \frac{\partial}{\partial t} \phi(\vec{r}, v, \vec{\Omega}, t) = & \\ & - \operatorname{div} [\vec{\Omega} \phi(\vec{r}, v, \vec{\Omega}, t)] - \Sigma_t(\vec{r}, v, \vec{\Omega}, t) \phi(\vec{r}, v, \vec{\Omega}, t) \\ & + \int_{4\pi} d\vec{\Omega}' \int_0^\infty dv' [\Sigma_s(\vec{r}, (v', \vec{\Omega}') \rightarrow (v, \vec{\Omega}), t)] \phi(\vec{r}, v', \vec{\Omega}', t) \\ & + S(\vec{r}, v, \vec{\Omega}, t) \end{aligned}$$

Walid DRIDI

M.E.N. - Neutronique - Chapitre 2

87/89

87

Equation-bilan de Boltzmann (10)



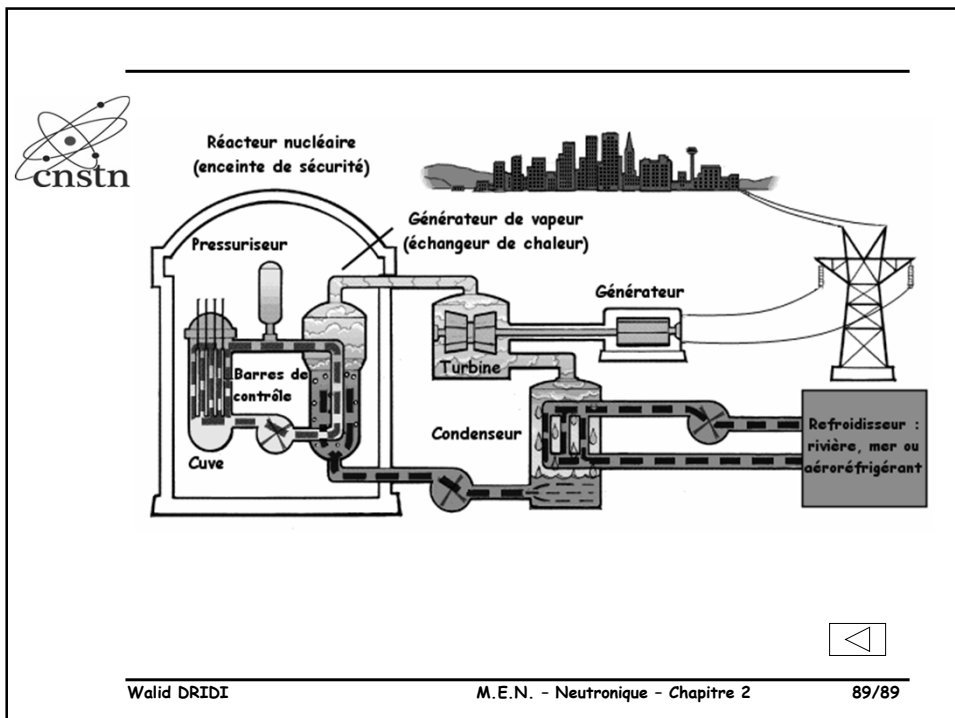
- L'équation de Boltzmann est trop complexe pour être abordée en toute généralité...
- Pour mettre en évidence les différents phénomènes physiques que cette équation permet de décrire, on choisit donc de s'intéresser successivement à la dépendance par rapport à chaque variable séparément.
- Il ne faut cependant pas perdre de vue que dans la réalité des couplages existent entre ces différentes variables.

Walid DRIDI


M.E.N. - Neutronique - Chapitre 2

88/89

88



89

 Contenu de DS

- Structure de la matière et énergie de liaison des noyaux
- Radioactivité
- Réactions par neutrons
- Fission

Walid DRIDI M.E.N. - Neutronique - Chapitre 1 90/89

90