



# Neutronique

## Chapitre 3 : Réaction en chaîne et bilan neutronique

Module Energie Nucléaire  
Classe : 3SETP  
2021/2022

1/50

1

### Notions à aborder



- Principe de la réaction en chaîne
- Facteur de multiplication et criticité
- Principaux modérateurs et filières de réacteurs
- L'histoire (la vie) d'un neutron
- Bilan neutronique en milieu infini et formule des 4 facteurs

2/50

2

## Notions à aborder (suite)



- Taille critique et facteur anti-fuite
- Réacteurs thermique (RNT) et rapide (RNR)
- Facteur de conversion et gain de surrégénération

3/50

3



## Principe de la réaction en chaîne

4/50

4

## Principe de réaction en chaîne



- Pour produire de l'énergie à échelle macroscopique, dans une centrale, un très grand nombre de réactions (fissions ou combustions) doit être réalisé à chaque instant.
- A la différence d'une autre centrale, une centrale nucléaire se caractérise par le fait que l'agent de ces réactions (le neutron) n'existe que comme un produit de la réaction elle-même\*.

\* En négligeant les fissions spontanées.

5/50

5

## Principe de réaction en chaîne (2)



- En conséquence, il sera nécessaire qu'il puisse s'y établir une réaction en chaîne : les neutrons émis lors d'une fission devront à leur tour provoquer d'autres fissions, et ainsi de suite...
- C'est le problème du maintien et de l'entretien de cette réaction en chaîne qui est tout l'enjeu de la physique neutronique.

6/50

6



# Facteur de multiplication et criticité

7/50

7

## Facteur de multiplication et criticité



- On s'intéresse à un neutron émis par fission dans un réacteur...
- Celui-ci va y évoluer, puis finir par disparaître :
  - Il peut fuir hors du cœur du réacteur (pour être capturé dans le réflecteur),
  - Il peut être capturé stérilement dans le cœur,
  - Il peut provoquer une nouvelle fission.

8/50

8

## Facteur de multiplication et criticité (2)



- Dans ce dernier cas, on assiste à la naissance d'un nombre  $\nu$  de nouveaux neutrons, avec pour les principaux noyaux fissiles :

Noyau	$^{233}\text{U}$	$^{235}\text{U}$	$^{239}\text{Pu}$	$^{241}\text{Pu}$
$\nu$ (nu)	$2,493 \pm 0,006$	$2,425 \pm 0,005$	$2,877 \pm 0,008$	$2,937 \pm 0,010$

9/50

9

## Facteur de multiplication et criticité (3)



- Si on note  $w$  la probabilité pour un neutron d'effectivement conduire à une nouvelle fission, on pourra suivre le nombre moyen de descendants d'un neutron placé dans le réacteur par le biais du facteur :

$$k_{\text{eff}} = w \times \nu$$

Probabilité pour un neutron  
de conduire à une fission

Nombre de neutrons émis  
en moyenne par fission

10/50

10

## Facteur de multiplication et criticité (4)



- Ce facteur  $k_{eff}$  va permettre de suivre l'évolution de la population neutronique dans le réacteur :
  - à partir d'un nombre  $N$  de neutrons,
  - on en obtiendra d'abord  $N \times k_{eff}$ ,
  - puis  $N \times k_{eff}^2$ ,  $N \times k_{eff}^3$ , ...traduisant ainsi la réaction en chaîne.
- Ce facteur est appelé le facteur de multiplication (effectif) du réacteur.

11/50

11

## Facteur de multiplication et criticité (5)



- Bien que la probabilité  $w$  soit nécessairement inférieure à 1, le facteur de multiplication peut lui dépasser 1,  $v$  étant relativement grand ( $>2.4$ )
- Or, sa position par rapport à l'unité dicte le sens de l'évolution :
  - Si  $k_{eff} > 1$ , la population de neutrons dans le réacteur croît avec le temps.  
La réaction s'accélère et le système est dit sur-critique.

12/50

12

## Facteur de multiplication et criticité (6)



- Si  $k_{\text{eff}} < 1$ , la population de neutrons décroît au contraire avec le temps.  
La réaction s'éteint et le système est dit sous-critique.
- Enfin, si  $k_{\text{eff}} = 1$ , la population de neutrons est stable.  
La réaction est juste entretenue et le système est dit (juste) critique.  
A noter : c'est ce que l'on réalise dans un réacteur en fonctionnement stable.

13/50

13



## Principaux modérateurs et filières de réacteurs

14/50

14

## Conditions pour une réaction en chaîne



- L'expression du facteur de multiplication :

$$k_{\text{eff}} = \omega \times \nu$$

montre que pour favoriser la réaction en chaîne, il faut maximiser la probabilité de nouvelles fissions.

- Problème :

- Les neutrons naissent à énergie élevée (2 MeV)
- Dans l'Uranium, la capture (stérile) par l' $^{238}\text{U}$  est alors largement plus probable que la fission de l' $^{235}\text{U}$ .



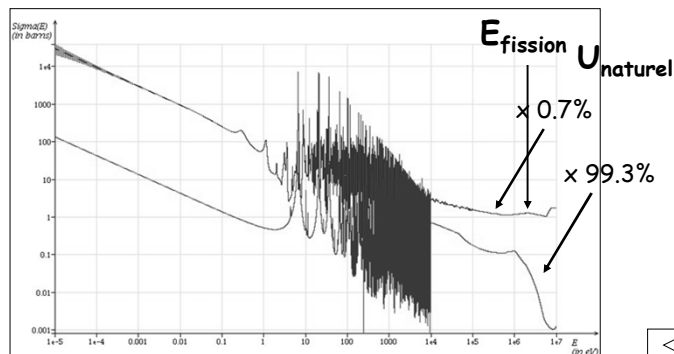
15/50

15

## Conditions pour une réaction en chaîne (2)



- Sections efficaces de fission de l'Uranium-235 et de capture de l'Uranium-238 :



16/50

16



### Conditions pour une réaction en chaîne (3)



- Deux voies sont alors envisageables :

➤ Enrichir le combustible en isotope(s) fissile(s) pour utiliser les neutrons à haute énergie,

➡ Filière des réacteurs à neutrons rapides (RNR)

➤ Ralentir les neutrons, puisqu'à basse énergie la probabilité d'une fission devient prépondérante.



➡ Filière des réacteurs à neutrons thermiques (RNT)

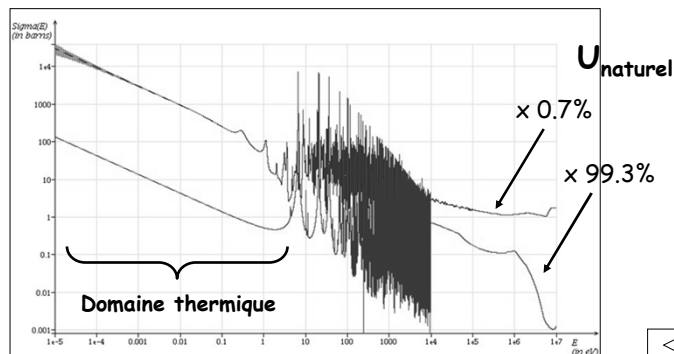
17/50

17

### Conditions pour une réaction en chaîne (4)



- Sections efficaces de fission de l'Uranium-235 et de capture de l'Uranium-238 :



18/50

18

## Notion de modérateur



- Le choix du ralentissement des neutrons (RNT) implique l'utilisation d'un matériau modérateur qui devra :
  - Permettre un ralentissement efficace des neutrons (présence de noyaux légers),
  - Etre peu capturant pour les neutrons.
- ➡ Choix restreint, fruit de compromis, avec des répercussions sur le combustible (ex des REP).



19/50

19

## Principaux modérateurs envisageables



- Caractéristiques des principaux modérateurs envisageables (et comparaison à l'Uranium) :

	H	D	C	O	U
$A$	1	2	12	16	238
$\xi$	1	0.725	0.158	0.120	0.008
$\sigma_a$ (b)	0,33	$0,5 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$0,3 \cdot 10^{-3}$	2,7
$n$ (2Mev à 1eV)	15	20	92	121	1731

Nécessité d'enrichir à qq %  
Ralentissement très efficace



20/50

20

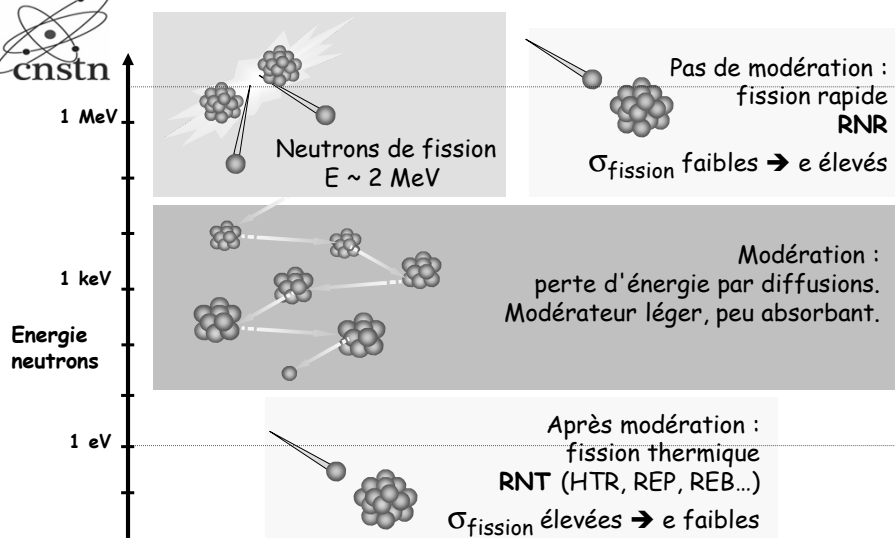


# Histoire (vie) d'un neutron

21/50

21

## Histoire (vie) d'un neutron



22/50

22



# Bilan neutronique en milieu infini et formule des 4 facteurs

23/50

23

## Bilan neutronique en milieu infini



- On s'intéresse à nouveau au « bilan neutronique » :

$$k_{eff} = \omega \times \nu$$

avec quelques hypothèses simplificatrices :

- Le milieu est supposé infini (les neutrons ne peuvent s'en échapper),
- Le combustible est supposé constitué d'un isotope fissile par les neutrons thermiques ( $U^{235}$ ), et d'un isotope uniquement capturant à basse énergie, au dessous de son seuil de fission ( $U^{238}$ ).

24/50

24

## Formule des 4 facteurs



- On peut alors proposer une décomposition phénoménologique de ce facteur de multiplication infini  $k_{\infty}$  en suivant l'histoire des neutrons entre leur naissance et leur disparition.
- On établit ainsi ce que l'on appelle la formule des 4 facteurs, qui donne :

$$k_{\infty} = \epsilon p f \eta$$

25/50

25

## Formule des 4 facteurs (2)



- Dans le cadre de cette décomposition, on raisonne uniquement pour des neutrons émis par fissions thermiques, et on tient compte des (rares) neutrons émis par fissions rapides par le biais d'un terme correctif qui est le terme  $\epsilon$ .
- $\epsilon$  est ainsi le facteur de (correction) de fission rapide, traduisant le fait que pour chaque neutron initialement compté, on a en fait  $\epsilon$  réellement disponibles.

26/50

26

### Formule des 4 facteurs (3)



- L'étape de la vie des neutrons à considérer ensuite est celle de leur ralentissement,
- Elle est prise en compte par le biais du facteur  $p$  appelé facteur anti-trappe,
- Celui-ci traduit la probabilité pour un neutron abordant le domaine du ralentissement de ne pas être capturé de manière improductive (capture stérile) dans les résonances.

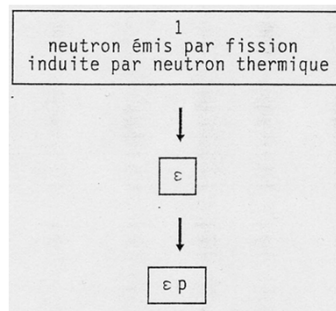
27/50

27

### Formule des 4 facteurs (4)



- A l'issue du ralentissement, on « dispose » ainsi de  $\varepsilon p$  neutrons à l'énergie thermique :



28/50

28

### Formule des 4 facteurs (5)



- Les deux facteurs suivants sont donc relatifs au domaine thermique,
- $f$  est ainsi le facteur d'utilisation thermique,
- Il représente la probabilité qu'un neutron, une fois thermalisé, soit absorbé utilement, c'est-à-dire dans le combustible plutôt que dans un autre milieu (modérateur, gaines).

29/50

29

### Formule des 4 facteurs (6)



- $\eta$  est le facteur de reproduction,
- Il représente le nombre de neutrons émis par fission, pour une absorption de neutron thermique dans le combustible,
- C'est donc le produit de la probabilité que l'absorption soit une fission par le nombre moyen de neutrons émis lors d'une fission.

30/50

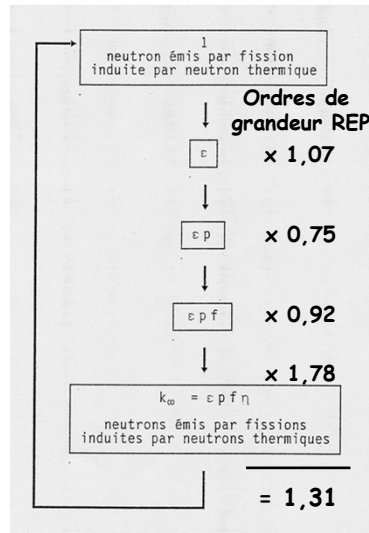
30

## Formule des 4 facteurs (7)



- Au final, on a :

- Cas REP-UOX à 3.5% d' $^{235}\text{U}$  :



31/50

31



## Taille critique et facteur anti-fuite

32/50

32



## Taille critique et facteur anti-fuite



- Lorsque l'on considère un milieu réel (fini), c'est le facteur de multiplication effectif qui donne le bilan neutronique.
- Facteurs de multiplications infini et effectif sont liés par :

$$k_{\text{eff}} = k_{\infty} \times \mathcal{F}$$

où  $\mathcal{F}$  est la probabilité, pour un neutron, de NE PAS subir une fuite hors du réacteur (probabilité ou facteur anti-fuite).

33/50

33

## Taille critique et facteur anti-fuite (2)



- Pour un milieu (multiplicateur) donné :
  - La valeur de  $k_{\infty}$  sera fixée par la composition du milieu,
  - Le nombre de neutrons formés sera proportionnel à son volume,
  - Le nombre de neutrons s'échappant sera lui proportionnel à sa surface,
- ➡ Il sera possible de « jouer » sur la probabilité anti-fuite en augmentant la taille du milieu.

34/50

34

## Taille critique et facteur anti-fuite (3)



- Or :

- Pour qu'une réaction en chaîne soit possible il faut que  $k_{\infty} > 1$ .
- Pour qu'elle puisse effectivement être entretenue il faut que  $k_{eff} = 1$  (criticité).
- ➡ Pour une valeur de  $k_{\infty}$  donnée, il correspondra donc une taille (et donc un volume) assurant la criticité. On parle de taille critique du système.

35/50

35



## RNR et RNT

36/50

36

## RNR/RNT



- **Considération générale :**

- Les RNT sont *a priori* plus complexes, puisqu'il faut y ralentir les neutrons naissant par fission,
- Mais dans les RNR, les difficultés technologiques sont en réalité nombreuses, notamment liées au modérateur puisqu'il faut alors éviter à tout prix les matériaux légers.



37/50

37

## Spectres RNR/RNT



- **Les filières technologiques RNR/RNT se distinguent par des spectres (répartition des neutrons en fonction de leur énergie) très différents :**

- Dans les RNR, on a simplement dégradation du spectre de fission, en raison de diffusions 
- Dans les RNT, le spectre à une allure caractéristique plus complexe 

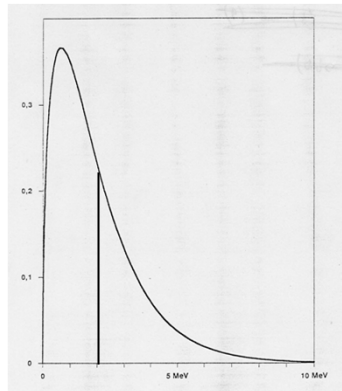
38/50

38

## Spectres RNR/RNT (2)



- Spectre de fission (exemple de l'Uranium) :



Energie moyenne  
 $E \sim 2 \text{ MeV}$



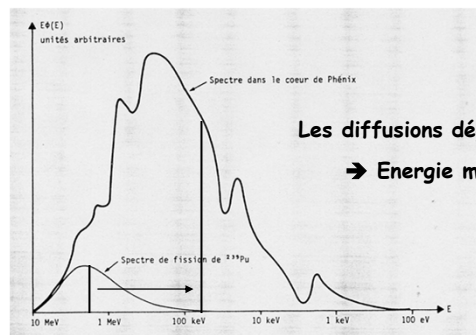
39/50

39

## Spectres RNR/RNT (3)



- Spectre de RNR (exemple de Phénix) :



Les diffusions dégradent le spectre  
→ Energie moyenne  $E > 50 \text{ keV}$



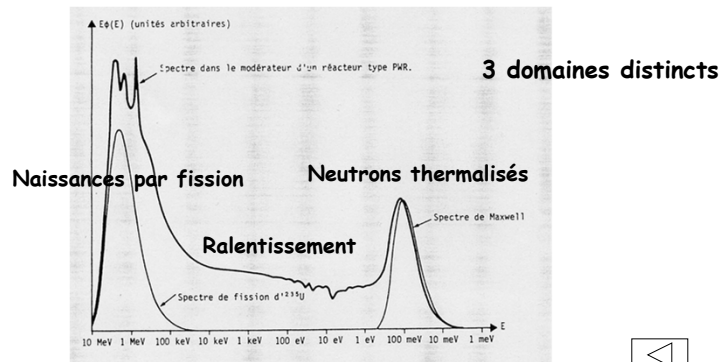
40/50

40

## Spectres RNR/RNT (4)



- Spectre de RNT (exemple d'un REP) :



41/50

41



## Facteur de conversion et gain de surrégénération

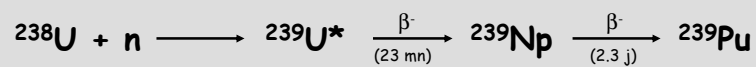
42/50

42

## Facteur de conversion



- La combustion du seul  $^{235}\text{U}$ , même en totalité, constituerait une utilisation insuffisante de l'Uranium naturel.
- Mais l'irradiation de l' $^{238}\text{U}$  permet la production de  $^{239}\text{Pu}$ , également fissile :



- Cette production à partir de l' $^{238}\text{U}$ , dit fertile, permet une utilisation plus complète de l'Uranium.

43/50

43

## Facteur de conversion (2)



- Autre matériau fertile, le  $^{232}\text{Th}$  qui permet (même principe) la production d' $^{233}\text{U}$ ,
- En réacteur, différentes associations « fissiles / fertiles » peuvent ainsi être envisagées, la plus courante étant l'Uranium naturel.
- Le principe est toujours le même : le réacteur, tout en produisant de l'énergie, convertit une partie des noyaux fertiles en noyaux fissiles.

44/50

44

### Facteur de conversion (3)



- On peut mesurer cette régénération du combustible par la définition d'un facteur de conversion, donnant le nombre de noyaux fissiles formés par noyau fissile consommé.
- Or, une fission produit (en moyenne)  $\eta$  nouveaux neutrons :
  - 1 est nécessaire pour la réaction en chaîne,
  - $\eta - 1$  est donc disponible pour cette conversion,

45/50

45

### Gain de surrégénération



- Or, il se trouve que  $\eta - 1$  peut dépasser 1,
- Le facteur de conversion peut dans ce cas théoriquement être supérieur à 1, ce qui traduit la formation de plus d'un nouveau noyau fissile par noyau initial,
- On parle alors de réacteur surrégénérateur qui, accroît le stock de matière fissile disponible tout en produisant de l'énergie.

46/50

46

## Gain de surrégénération (2)



- En pratique, il faut cependant tenir compte du fait que des absorptions parasites (modérateur, matériaux de structure) réduisent sensiblement la fraction de neutrons disponible pour la conversion,
- Il faut donc que  $\eta - 1$  dépasse nettement 1 pour que cette surrégénération soit possible,
- Seuls certains noyaux « conviennent » alors, comme le  $^{239}\text{Pu}$  en spectre rapide, pour lequel  $\eta$  vaut entre 2.5 et 3.

47/50

47

## Application



- Calcul du paramètre  $\eta$  de l' $\text{UO}_2$  en fonction de l'enrichissement (valeurs à 0,7%, 3%, 5%, 20%, 95%) :

### Données

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

$$\sigma_f = 580 \text{ b}$$

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

$$\nu (^{235}\text{U}) = 2.42$$

$$\text{UO}_2 : d^{\text{té}} = 10.3 \text{ g/cm}^3$$

48/50

48



## Application - Correction



• A utiliser :  $\eta = v \times (\Sigma f_{\text{comb}} / \Sigma a_{\text{comb}})$

➤ Sections : ✓  $\Sigma f_{\text{comb}} = \Sigma f_{U5} = N_5 \times \sigma f_{U5}$

✓  $\Sigma a_{\text{comb}} = \Sigma a_{U5} + \Sigma a_{U8}$

✓  $\Sigma a_{U5} = N_5 \times \sigma a_{U5}$  et  $\Sigma a_{U8} = N_8 \times \sigma a_{U8}$

➤ Densités d'atomes :

✓  $N_5 = N_{\text{comb}} \times e_{U5}$

✓  $N_8 = N_{\text{comb}} \times (1 - e_{U5})$

49/50

49

## Application - Correction (2)



• On a donc :

✓  $\eta = v \times (N_5 \times \sigma f_{U5}) / (N_5 \times \sigma a_{U5} + N_8 \times \sigma a_{U8})$

✓  $\eta = v \times (e \times \sigma f_{U5}) / (e \times \sigma a_{U5} + (1-e) \times \sigma a_{U8})$

✓  $\eta = (v \times \sigma f_{U5}) / (\sigma a_{U5} + [(1-e)/e] \times \sigma a_{U8})$

➡  $\eta_{(0.7\%)} \approx 1.32$

➡  $\eta_{(3\%)} \approx 1.83$  et  $\eta_{(5\%)} \approx 1.92$

➡  $\eta_{(20\%)} \approx 2.03$  et  $\eta_{(95\%)} \approx 2.07$

50/50

50