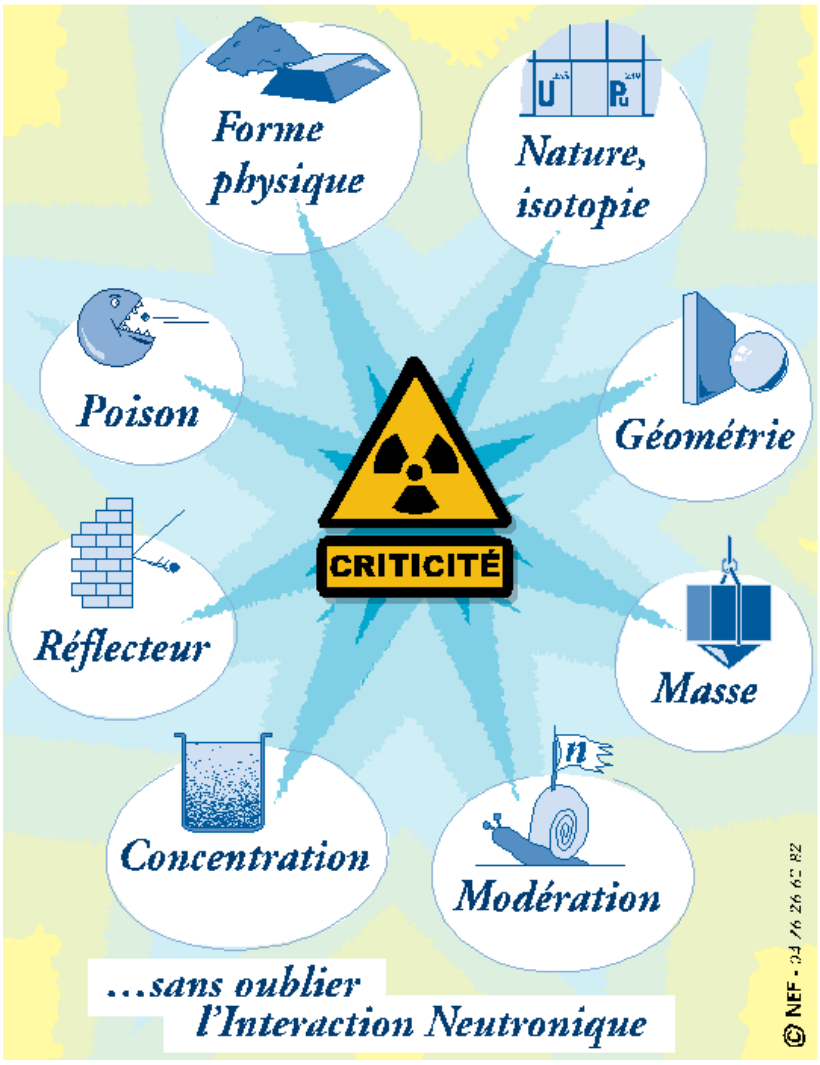
# FICHE N°1

## INTRODUCTION À LA CRITICITÉ




*Ce document, élaboré pour la réalisation d'études de sûreté-criticité, est la propriété du CEA. Il ne se substitue en aucun cas à une analyse de sûreté-criticité ou à l'avis d'un ingénieur criticien et ne peut pas servir de référence directe.*

## Généralités

⇨ Les **matières fissiles**, comme l'uranium enrichi en isotope 235 ou le plutonium, présentent la propriété, sous certaines conditions, d'entretenir des **réactions de fission en chaîne**. Cette propriété est utilisée pour produire de l'énergie dans les réacteurs nucléaires. Mises en œuvre dans le cycle du combustible (laboratoires, usines, transports…), leur présence induit un risque particulier : le **risque de criticité**, qui est le risque de réunir les conditions d'amorçage et d'entretien de réactions en chaînes conduisant à l'accident de criticité.

## Interaction neutron-matière

⇨ Le **neutron** est une particule élémentaire, électriquement neutre, qui interagit avec les noyaux des atomes qu'il rencontre sur sa trajectoire. Il convient de distinguer plusieurs modes d'interaction :

- La **diffusion élastique** (réémission du neutron dans une direction quelconque avec conservation de la quantité de mouvement) ;
- La **diffusion inélastique** (capture du neutron par le noyau avec réémission d'un neutron et de rayonnement $\gamma$ sans conservation de la quantité de mouvement) ;
- L'**absorption par un noyau du milieu** (pour un noyau fissile, il peut s'ensuivre une fission, sinon il y a capture par le noyau avec formation d'un isotope dans un état excité et retour à l'état fondamental par émission de rayonnements $\gamma$).

⇨ La probabilité d'interaction d'un neutron avec la matière est proportionnelle au nombre de noyaux de la matière. Le coefficient de proportionnalité est la **section efficace microscopique ($\sigma$)**, caractéristique du noyau, du type d'interaction avec le neutron et de son énergie (unité : barn, avec 1 barn = $10^{-24}$ $cm^2$).

⇨ Le **libre parcours moyen ($\lambda$)** est la distance parcourue en moyenne par le neutron avant la première interaction. Dans les matériaux usuels, $\lambda$ est de l'ordre du cm, dimension importante au regard de la dimension des atomes ($10^{-8}$ à $10^{-10}$ cm).

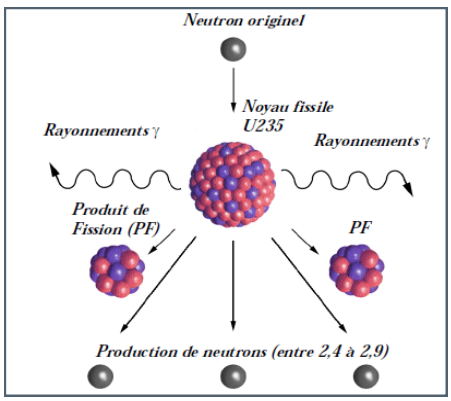
## La réaction de fission

⇨ La fission nucléaire est le phénomène par lequel le noyau d'un atome, dit **fissile**, est divisé en deux nucléides plus légers, appelés **produits de fission (PF)**. Les noyaux fissiles sont des noyaux lourds comme, par exemple, ceux de l'uranium et du plutonium. Cette réaction peut être :

- Spontanée : la désintégration s'opère sans absorption préalable d'une particule ;
- Induite : la désintégration s'opère après absorption d'une particule (généralement, un neutron).

⇨ Les réactions de fission induites s'accompagnent, au-delà de l'éclatement du noyau fissile :

- D'une intense **libération d'énergie** (environ 200 MeV) ;
- D'un **rayonnement** $\gamma$ ;
- De la **libération de neutrons (**en moyenne, 2,4 pour $^{235}U$ et 2,9 pour $^{239}Pu$).




*Réaction de fission induite*

*Ce document, élaboré pour la réalisation d'études de sûreté-criticité, est la propriété du CEA. Il ne se substitue en aucun cas à une analyse de sûreté-criticité ou à l'avis d'un ingénieur criticien et ne peut pas servir de référence directe.*

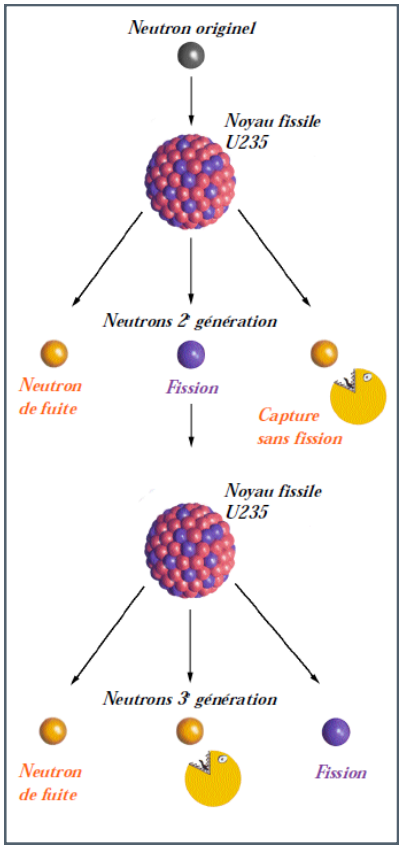
## La réaction de fission en chaine

⇨ Les neutrons issus des réactions de fission vont alors :

- Soit être absorbés par un atome fissile et provoquer d' autres réactions de fission produisant de nouveaux neutrons (**production de neutrons par fission**) ;
- Soit être absorbés par des atomes du milieu environnant (**capture sans fission**) ;
- Soit quitter le milieu fissile (**fuite** hors du milieu).

⇨ Dans ces deux derniers cas, le neutron ne participe plus à la production de nouveaux neutrons.

⇨ Les conditions de criticité, et donc d'un éventuel déclenchement d'une réaction de fission en chaîne incontrôlée pouvant conduire à un accident de criticité, résultent du bilan de **PRODUCTION** de neutrons par fission et de leur perte par **ABSORPTION** (avec ou sans fission) et par **FUITE**.




*Réaction en chaîne*

⇨ En criticité, l'état d'un milieu fissile est caractérisé par le **facteur de multiplication effectif**, noté $k_{eff}$.

$$k_{eff} = \frac{\text{neutrons génération n}}{\text{neutrons génération n} - 1} = \frac{\text{PRODUCTION}}{\text{ABSORPTION} + \text{FUITE}}$$

Nota : Lorsque les dimensions géométriques sont suffisamment importantes pour que la proportion de fuites soit négligeable (milieu dit « infini »), on parle de facteur de multiplication infini, noté $k_\infty$.

⇨ **Si $k_{eff} < 1$** : la réaction en chaîne est inhibée. Il s'agit de **l'état sous-critique** qui caractérise l'état sûr de fonctionnement des installations nucléaires (hors réacteur) ;

⇨ **Si $k_{eff} = 1$** : la réaction en chaîne est maîtrisée. Il s'agit de **l'état critique** pour lequel la population des neutrons reste constante. Cet état est celui visé dans les réacteurs nucléaires ; il convient en revanche de ne jamais l'atteindre dans les autres installations nucléaires et lors des transports ;

⇨ **Si $k_{eff} > 1$** : une réaction de fissions en chaîne incontrôlée démarre, entraînant une production importante de neutrons non compensée par l'absorption des neutrons par le milieu ou leur fuite de celui-ci. Il s'agit de **l'état sur-critique** conduisant à l'accident de criticité.

Nota : La comparaison entre les $k_{eff}$ de deux milieux est souvent exprimée en pcm (*pour cent mille*).
Exemple : entre un milieu 1 de $k_{eff}$ égal à 0,93 et un milieu 2 de $k_{eff}$ égal à 0,92, la différence de $k_{eff}$ vaut : 0,93 - 0,92 = 0,01 = 1000 pcm.

*Ce document, élaboré pour la réalisation d'études de sûreté-criticité, est la propriété du CEA. Il ne se substitue en aucun cas à une analyse de sûreté-criticité ou à l'avis d'un ingénieur criticien et ne peut pas servir de référence directe.*

## Les paramètres influant sur le $k_{eff}$

⇨ Outre les différentes sections efficaces (fission, capture sans fission, diffusion…), plusieurs paramètres influent directement sur les différents termes du bilan neutronique :

| | |
|---|---|
| **PRODUCTION DE NEUTRONS PAR FISSION** | Quantité de matière fissile (masse, concentration)<br>Qualité de la matière fissile ($^{235}$U, $^{239}$Pu, $^{241}$Pu…)<br>Modération |
| **ABSORPTION DES NEUTRONS** | Capture par :<br>- Poison (bore, gadolinium…)<br>- Isotopes absorbants ($^{238}$U, $^{240}$Pu…)<br>- Milieu environnant (structures…)<br>- Hydrogène |
| **FUITE DES NEUTRONS** | Densité du milieu fissile / concentration<br>Forme géométrique<br>Réflexion neutronique<br>Interactions avec des milieux fissiles à proximité |

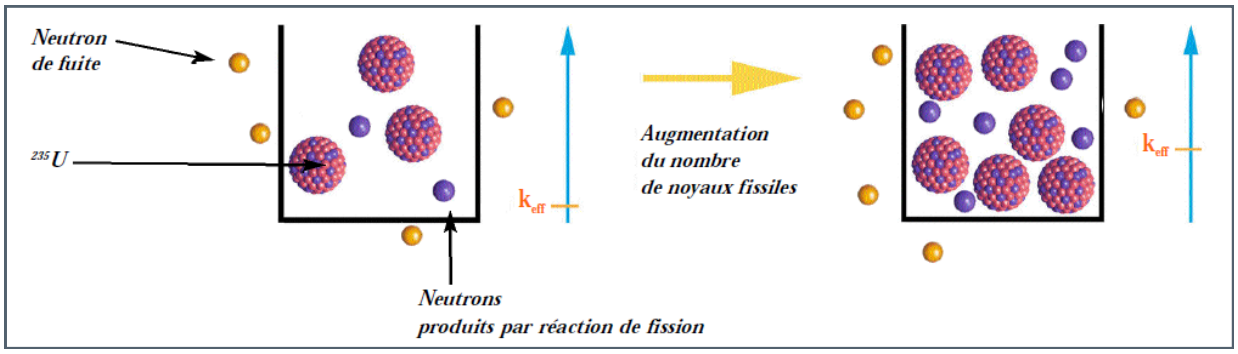
Ces termes sont définis dans les paragraphes qui suivent.

### *Production de neutrons : masse de matière fissile*

⇨ La production de neutrons croît avec le nombre de noyaux fissiles, c'est-à-dire :

- Par **augmentation de la masse totale de matière fissile** (uranium par exemple) ;
- Par **augmentation**, pour une même masse de matière fissile, **de l'enrichissement en isotopes fissiles** ($^{235}$U par exemple).

En effet, la probabilité de rencontrer un noyau fissile et de provoquer une réaction de fission devient plus importante avec l'augmentation du nombre de noyaux fissiles.




Exemple : masses d'uranium métal, modéré par de l'eau, conduisant à un $k_{eff}$ égal à 1 (optimum de modération, réflexion par 20 cm d'eau) :

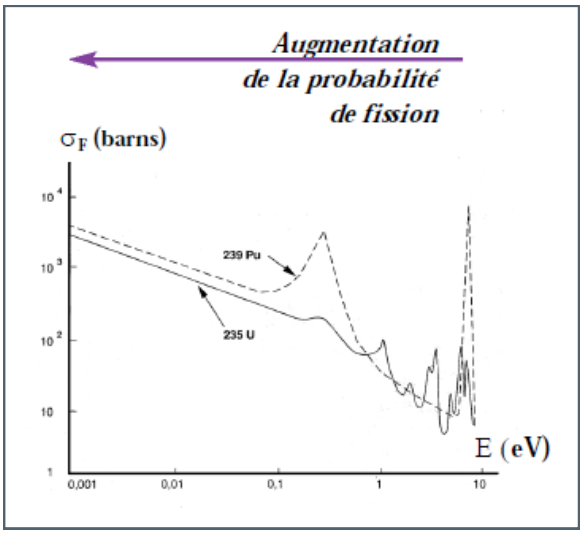
- ⇨ **34,5 kg** d'U enrichi à **5 % en isotope 235** *(cf. note SERMA/CP2C/NT/17-6186/A)* ;
- ⇨ **12,3 kg** d'U enrichi à **10 % en isotope 235** *(cf. note SERMA/CP2C/NT/17-6187/A)* ;
- ⇨ **850 g** d'U enrichi à **93,5 % en isotope 235** *(cf. note SERMA/CP2C/NT/16-6014/A)*.

☞ *Pour plus d'informations sur le paramètre « masse » : voir fiche n°7*

*Ce document, élaboré pour la réalisation d'études de sûreté-criticité, est la propriété du CEA. Il ne se substitue en aucun cas à une analyse de sûreté-criticité ou à l'avis d'un ingénieur criticien et ne peut pas servir de référence directe.*

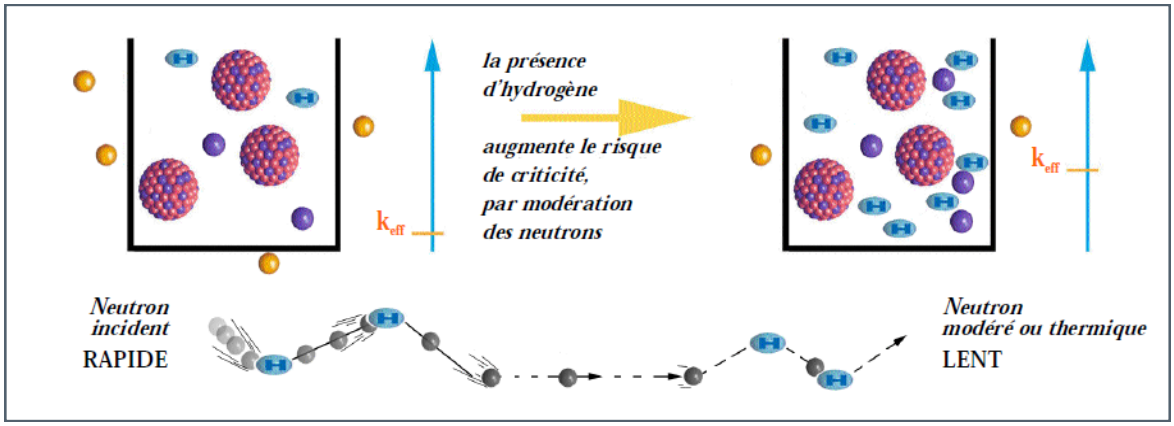
## *Production de neutrons utiles : modération*

⇨ La réaction de fission produit des *neutrons rapides*, i.e. de forte énergie (de l'ordre de 2 MeV en moyenne). Or la probabilité pour un neutron d'être absorbé par un noyau fissile et de provoquer une réaction de fission (section efficace de fission) est d'autant plus importante que l'énergie du neutron incident est faible, c'est-à-dire pour des **neutrons lents**, également appelés **neutrons modérés ou thermiques**.




*Sections efficaces de fission de $^{235}U$ et $^{239}Pu$ en fonction de l'énergie des neutrons*

⇨ **La modération est le phénomène de ralentissement des neutrons** par diffusion sur les noyaux du modérateur lors de collisions successives. **Plus les noyaux sont légers (hydrogène de l'eau, des matières plastiques et des huiles, carbone...), plus la modération est efficace**.




Nota : Pour obtenir un neutron lent, il faut environ :

- 18 chocs dans l'eau ;
- 110 chocs dans le graphite ;
- 2000 chocs dans le plomb.

Nota : Dans les études, l'eau est généralement prise en considération comme élément modérateur. Attention, car il existe cependant des matériaux plus modérateurs que l'eau (ex : $CH_2$).

Exemple : Masse sphérique critique pour du Pu métal modéré par de l'eau (100 % $^{239}Pu$, réflexion par 20 cm d'eau) (*) :

- ~ 5,4 kg de Pu en l'absence de modération (à sec) ;
- ~ 500 g de Pu à l'optimum de modération (l'optimum de modération pour la masse est la quantité d'eau qui conduit à la masse critique la plus faible).

(*) *cf. note SERMA/CP2C/NT/17-6169/A)*

⇨ Le **rapport de modération en milieu homogène** est noté **H/X** et correspond au rapport du nombre de noyaux de modérateur (en général, H) sur le nombre de noyaux fissiles (X). Pour le plutonium, il est exprimé en H/Pu et, pour l'uranium, en H/U ou H/$^{235}U$, dans le cas d'une modération par une matière hydrogénée (eau, matière plastique…).

☞ *Pour plus d'informations sur le paramètre « modération » : voir fiches n°10 et 12*

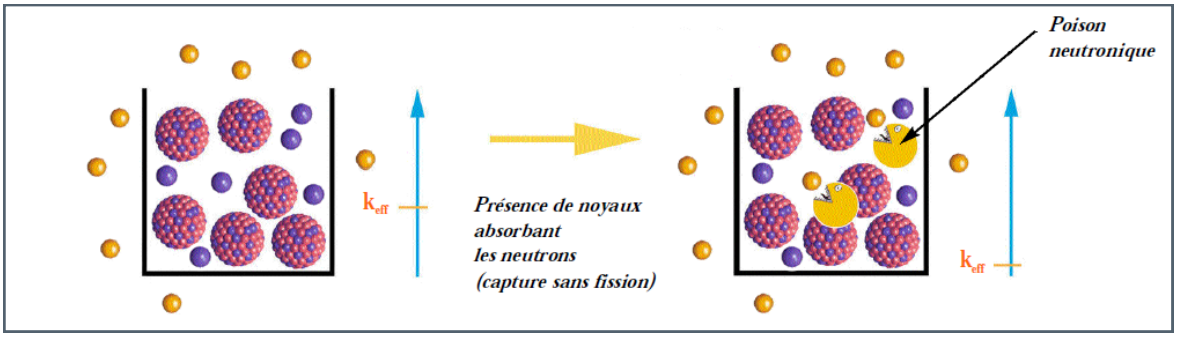
*Ce document, élaboré pour la réalisation d'études de sûreté-criticité, est la propriété du CEA. Il ne se substitue en aucun cas à une analyse de sûreté-criticité ou à l'avis d'un ingénieur criticien et ne peut pas servir de référence directe.*

## *Perte des neutrons : absorption sans fission (capture)*

⇨ Les noyaux ont une probabilité plus ou moins importante d'absorber les neutrons, également appelé **capture sans fission**. Les neutrons absorbés sont ainsi définitivement perdus.

⇨ Il est possible de distinguer :

- Les matériaux absorbants qui font partie des milieux usuellement rencontrés ;
- Les matériaux spécifiquement utilisés pour leurs propriétés absorbantes, appelés **poisons neutroniques** ou **neutrophages**.



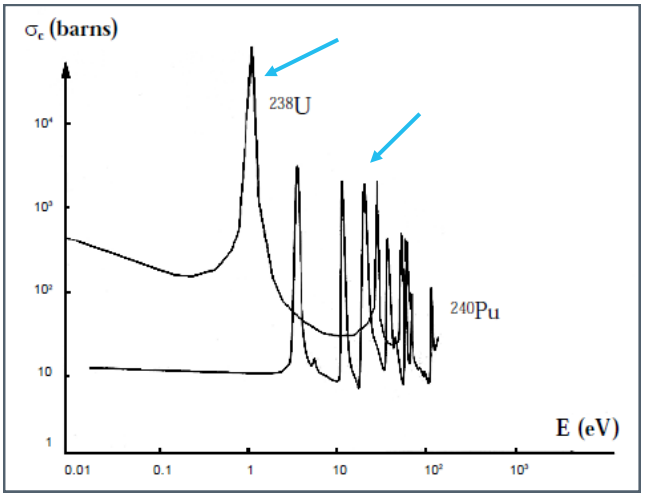

⇨ Les matériaux absorbants usuellement rencontrés sont :

- **L'hydrogène** : c'est un noyau qui, bien qu'il favorise les réactions de fission du fait de son pouvoir modérateur, présente un caractère absorbant lorsqu'il est présent en quantités importantes dans la matière fissile (effet d'absorption).
  Nota : dans le cas des solutions, présent dans l'eau, il contribue également à diminuer la concentration en noyaux fissiles (effet de dilution) : voir ci-après;
- **L'azote** : comme l'hydrogène, l'azote a une section efficace de capture sans fission pour les neutrons thermiques relativement faible, mais il a un effet absorbant plus notable dès qu'il est présent en grandes quantités au sein de la matière fissile. C'est le cas, par exemple, des solutions de nitrate d'uranyle et de nitrate de plutonium ;

Nota : triple rôle de l'hydrogène :
- Densité ;
- Modération ;
- Absorption.

Nota : Une solution de nitrate d'uranyle est toujours sous-critique, quelles que soient les dimensions du milieu (on parle de **milieu infini** dans lequel les neutrons ne peuvent pas fuir), dès lors que l'enrichissement en $^{235}U$ est inférieur à 2,1 %, alors que l'uranium sous forme d'oxyde ($UO_2$) peut être sur-critique dès que l'enrichissement est supérieur à 1 %.

- **Les isotopes 238 de l'uranium et 240 du plutonium** : ces noyaux ont des sections de capture résonantes, appelées « trappes », pour lesquelles la probabilité de capture sans fission des neutrons est très grande pour certaines valeurs d'énergie des neutrons.



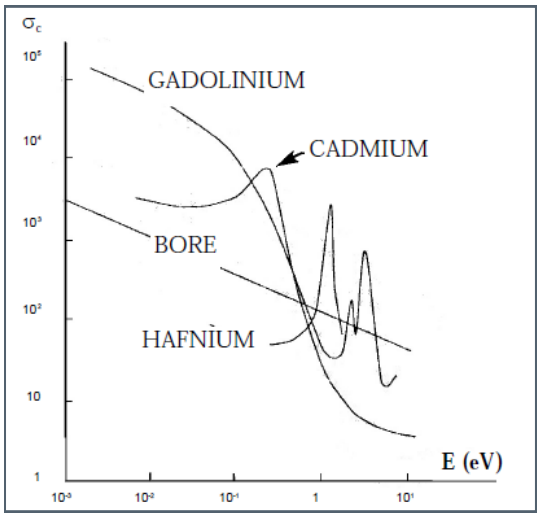

*Sections efficaces de capture de $^{238}U$ et $^{240}Pu$ en fonction de l'énergie des neutrons*

Nota : Un milieu homogène d'uranium en présence d'eau ne peut être critique pour un enrichissement inférieur à 1 % (milieu infini). En effet, les neutrons, lors de leur ralentissement, sont majoritairement absorbés dans les trappes de l'$^{238}U$.

*Ce document, élaboré pour la réalisation d'études de sûreté-criticité, est la propriété du CEA. Il ne se substitue en aucun cas à une analyse de sûreté-criticité ou à l'avis d'un ingénieur criticien et ne peut pas servir de référence directe.*

⇨ Les **poisons neutroniques** les plus courants sont le **bore** (B), le **cadmium** (Cd), le **gadolinium** (Gd) et l'**hafnium** (Hf). Ils sont utilisés à dessein pour diminuer la réactivité d'un système compte tenu de leur effet absorbant. Leur efficacité augmente, pour la plupart d'entre eux, lorsque les neutrons sont modérés (les sections efficaces de capture d'autant plus importantes que les neutrons sont modérés). Ces noyaux peuvent être mis en œuvre :

- Sous forme soluble (par exemple, nitrate de gadolinium) : on parle d'empoisonnement homogène ;
- Sous forme fixe (structure des équipements en acier boré, anneaux de Raschig en verre borosilicate...) : on parle d'empoisonnement hétérogène.

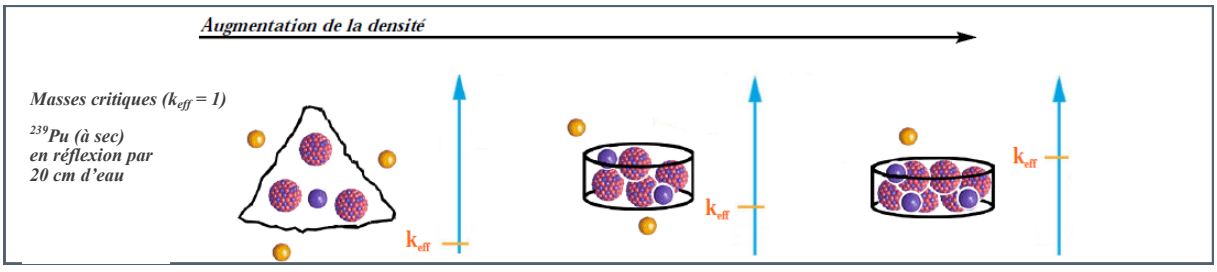



*Sections efficaces de capture du B, Cd, Gd, Hf en fonction de l'énergie des neutrons*

☞ *Pour plus d'informations sur le paramètre « empoisonnement » : voir fiche n°13*

## *Fuite du milieu fissile : effet de la densité*

⇨ **Dans un milieu sec ou faiblement modéré**, plus la **densité du milieu** est forte, plus les noyaux sont rapprochés, et donc plus la probabilité qu'a un neutron de fuir hors du milieu sans interagir avec un autre noyau fissile est faible.




| *Poudre $PuO_2$ (densité 3,5) : ~ 65 kg de Pu (cf. note SERMA/CP2C/NT/17-6174/A)* | *$PuO_2$ fritté (densité 11,46) : ~ 11,7 kg de Pu (cf. note SERMA/CP2C/NT/17-6175/A)* | *Pu métal (densité 19,8) : ~ 5,4 kg de Pu (cf. note SERMA/CP2C/NT/17-6169/A)* |
|---|---|---|

⇨ **Dans un milieu modéré (solution)**, l'effet de la densité est remplacé par l'effet de la **concentration en matières fissiles.** Plus la concentration en matières fissiles est faible (dilution), plus les réactions de fission sont rares.

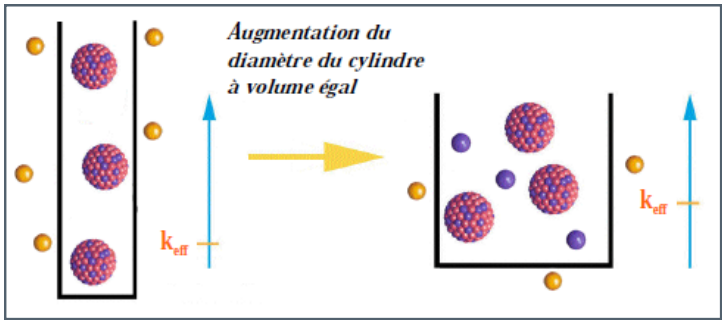
☞ *Pour plus d'informations sur le paramètre « concentration » : voir fiche n°9*

*Ce document, élaboré pour la réalisation d'études de sûreté-criticité, est la propriété du CEA. Il ne se substitue en aucun cas à une analyse de sûreté-criticité ou à l'avis d'un ingénieur criticien et ne peut pas servir de référence directe.*

## *Fuite du milieu fissile : effet de la géométrie*

⇨ Les formes géométriques favorisent plus ou moins la fuite des neutrons du milieu. Lorsque certaines dimensions du milieu sont suffisamment faibles par rapport au libre parcours moyen du neutron, la probabilité que le neutron quitte le milieu fissile sans provoquer de réaction de fission augmente.

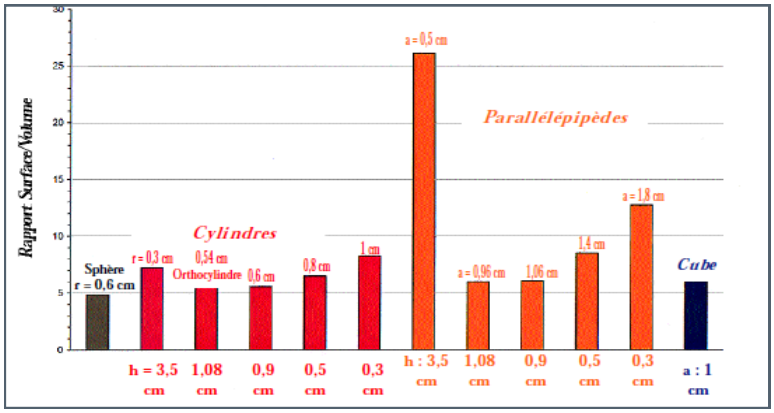
⇨ En-deçà de certaines dimensions, ces fuites peuvent être suffisamment importantes pour assurer l'absence de risque de criticité au sein d'un équipement, quelles que soient la modération et la quantité de matière fissile. On parle d'équipement de **géométrie sûre**.



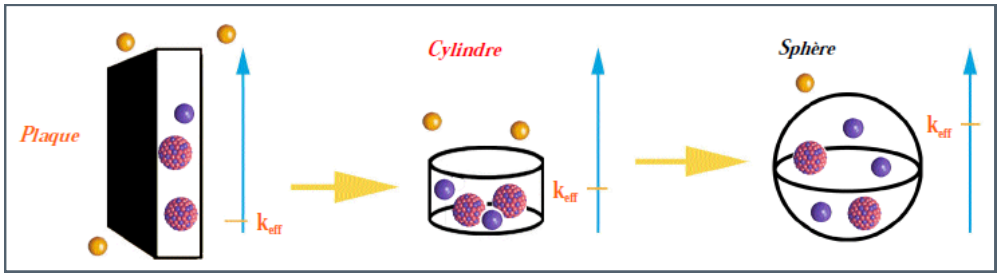

⇨ Lorsque la forme physique de la matière fissile ne peut être garantie (manipulation de lots de produits solides, risque de modification de la forme géométrique...), les limites de masse sont déterminées en prenant comme hypothèse que la matière se trouve sous forme **sphérique** (on parle de masses critiques sphériques). En effet :

- Pour un volume de matière donné, la sphère est la forme géométrique la plus pénalisante (c'est-à-dire, la forme pour laquelle le $k_{eff}$ est le plus élevé) : elle présente la surface externe la plus faible, favorisant le moins la fuite des neutrons du milieu fissile (voir graphe ci-après) et augmentent ainsi le $k_{eff}$ ;
- Cette configuration couvre, du point de vue de la criticité, **toutes les configurations géométriques**, <u>en l'absence d'interactions neutroniques</u>.

⇨ A l'inverse, les formes géométriques comme les **cylindres**, les **plaques**, les **anneaux**… favorisent la fuite des neutrons hors du milieu fissile : à volume égal, le $k_{eff}$ est plus faible que dans le cas d'une sphère.




*Sphère (rayon r), cylindre (rayon r, hauteur h), cube (côté a) et parallélépipède (hauteur h, base carrée a²) pour un volume donné de 1 cm³*



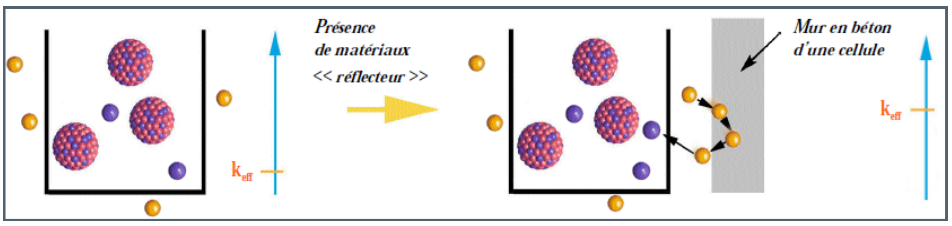

☞ *Pour plus d'informations sur le paramètre « géométrie » : voir fiche n°8*

*Ce document, élaboré pour la réalisation d'études de sûreté-criticité, est la propriété du CEA. Il ne se substitue en aucun cas à une analyse de sûreté-criticité ou à l'avis d'un ingénieur criticien et ne peut pas servir de référence directe.*

## *Retour des neutrons vers un milieu fissile : réflexion*

⇨ La **réflexion** caractérise le fait qu'**une partie des neutrons qui sort du milieu fissile peut y revenir**, après diffusion dans les matériaux environnants : matériaux de structure, circuit de refroidissement d'un équipement, cloisons, murs et plafond des cellules, machines, personnels… Ces matériaux ramènent vers le milieu fissile des neutrons qui en auraient fui en leur absence, leur permettant ainsi de participer à la production de nouveaux neutrons.

⇨ La capacité de réflexion d'un milieu dépend de sa **nature physico-chimique** et de son **épaisseur**. Il est généralement tenu compte, dans les calculs de criticité, pour considérer une réflexion enveloppe, d'une épaisseur de **20 cm d'eau**. Cependant, certains milieux comme le béton ou le plomb, mais aussi certains plastiques et métaux, peuvent être plus pénalisants.




Exemple : Masse sphérique critique pour du Pu métal modéré par de l'eau, à l'optimum de modération (100 % $^{239}$Pu) :
- ~ 900 g sans réflexion (sphère nue) ;
- ~ 500 g en réflexion par 20 cm d'eau.

*(cf. note SERMA/CP2C/NT/17-6169/A)*

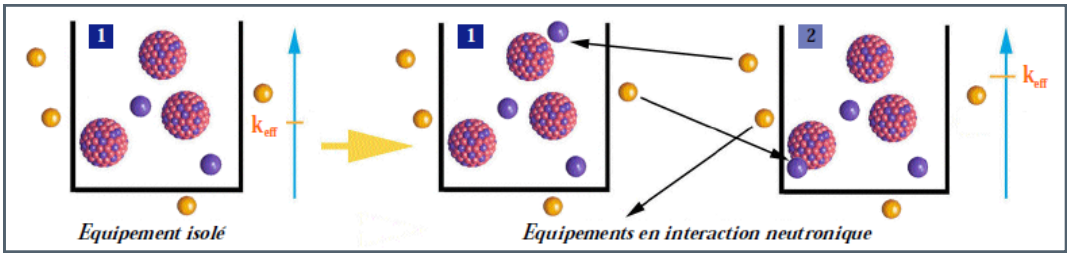
☞ *Pour plus d'informations sur les réflecteurs : voir fiche n°15*

## *Retour des neutrons vers un milieu fissile : interactions neutroniques*

⇨ Dans le cas de deux équipements (nommés 1 et 2) contenant de la matière fissile et situés à proximité, une partie des neutrons quittant l'équipement 1 peut pénétrer et interagir avec la matière fissile contenue dans l'équipement 2, et réciproquement : c'est l'**interaction neutronique**, qui est fonction de l'angle solide entre les équipements.

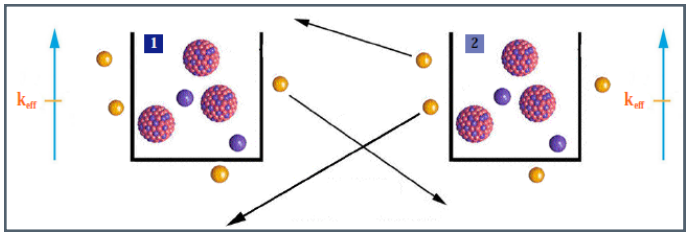
⇨ Ces interactions neutroniques augmentent le $k_{eff}$ global.

⇨ Elles doivent être prises en compte lors de l'implantation d'un nouvel appareillage.

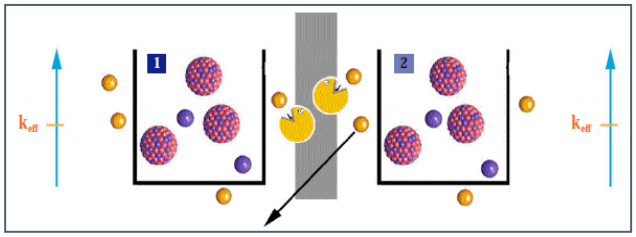



⇨ L'interaction peut être atténuée par :
- **Réduction de l'angle solide** :
  - éloignement entre les équipements,
  - placement des équipements « en ligne » ;
- **Interposition d'un écran neutrophage**.

Attention : En fonction du matériau utilisé, l'interposition d'un écran entre deux équipements peut également augmenter les phénomènes de réflexion des neutrons. La compétition entre les phénomènes de diminution des interactions et d'augmentation de la réflexion doit être étudiée au cas par cas.




Éloignement de 1 et 2




Interposition d'un écran entre 1 et 2

☞ *Pour plus d'informations sur les interactions neutroniques : voir fiche n°16*

*Ce document, élaboré pour la réalisation d'études de sûreté-criticité, est la propriété du CEA. Il ne se substitue en aucun cas à une analyse de sûreté-criticité ou à l'avis d'un ingénieur criticien et ne peut pas servir de référence directe.*

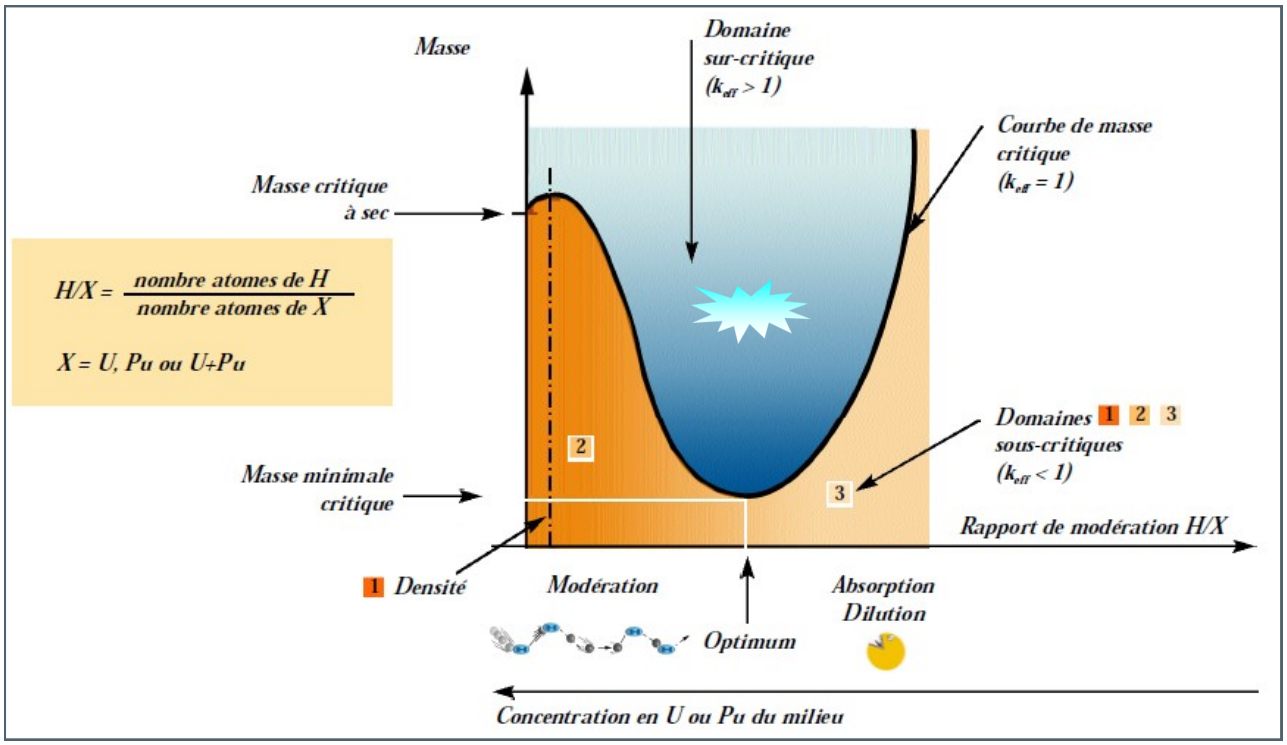
## Comportement d'un paramètre critique en fonction de la quantité de modérateur

⇨ Les courbes de variation des paramètres critiques (masse ou dimensions géométriques) d'un milieu constitué d'uranium ou de plutonium en fonction de la modération résultent de la **combinaison de 3 effets dus à la présence de l'hydrogène** (ou d'autres noyaux modérateurs) :

- La densité ;
- La modération ;
- L'absorption.

⇨ La courbe suivante montre l'évolution de la masse critique (masse de matière fissile sous forme sphérique, mélangée de façon homogène avec le modérateur) d'un milieu fissile en fonction du **rapport de modération** (rapport du nombre de noyaux de modérateur sur le nombre de noyaux fissiles U ou Pu), par exemple H/U ou H/Pu dans le cas d'une modération par de l'eau.

Cette courbe est établie pour un système isolé et des conditions de réflexion données.




⇨ Lorsque de la matière fissile sans eau (produit sec) est mise en solution, et que le volume d'eau augmente, la dilution de la matière fissile dans l'eau entraîne successivement :

**1** Une diminution de la concentration en matière fissile dans la solution (donc de la densité partielle), ce qui favorise un libre parcours moyen du neutron plus important et donc une augmentation du nombre de fuites de neutrons hors du milieu. Ceci se traduit par une augmentation de la masse de matière fissile par rapport à celle correspondant au produit sec pour conserver la même valeur de $k_{eff}$ (ici la valeur de 1).

Nota : cet effet est prépondérant en présence de faibles quantités de modérateur, par exemple, pour les milieux métalliques. Pour d'autres milieux comme les sels et les oxydes d'U et de Pu ($UO_2F_2$, $UO_2$, $PuO_2F_2$, $PuO_2$), cet effet n'est pas observé.

**2** Une augmentation du pouvoir de modération du milieu (ralentissement des neutrons) et donc de la faculté de ce milieu à produire des neutrons. Ceci se traduit par une diminution de la masse de matière fissile pour conserver la même valeur de $k_{eff}$.

**3** Enfin, en présence d'eau en quantité suffisamment importante, les effets d'absorption et de dilution de l'eau deviennent prépondérants : pour une même valeur de $k_{eff}$, la masse de matière fissile augmente.

*Ce document, élaboré pour la réalisation d'études de sûreté-criticité, est la propriété du CEA. Il ne se substitue en aucun cas à une analyse de sûreté-criticité ou à l'avis d'un ingénieur criticien et ne peut pas servir de référence directe.*

⇨ Le minimum de la courbe est obtenu pour une valeur de rapport de modération appelée **optimum de modération** $(H/X)_{optimum}$, qui correspond à la **masse minimale critique**. Pour une quantité de matière fissile inférieure à cette dernière, tout système est sous-critique ($k_{eff} < 1$) quelles que soient sa forme géométrique (prise sous forme de sphère de manière pénalisante) et sa modération, pour des conditions de réflexion données.

⇨ La variation des paramètres de géométrie (volume d'une sphère, diamètre d'un cylindre de hauteur infinie, épaisseur de plaque de section infinie) en fonction de la modération est similaire, sauf que l'optimum de modération n'est pas obtenu pour la même valeur de H/X dans le cas de la géométrie ou dans celui de la masse. On parle respectivement :

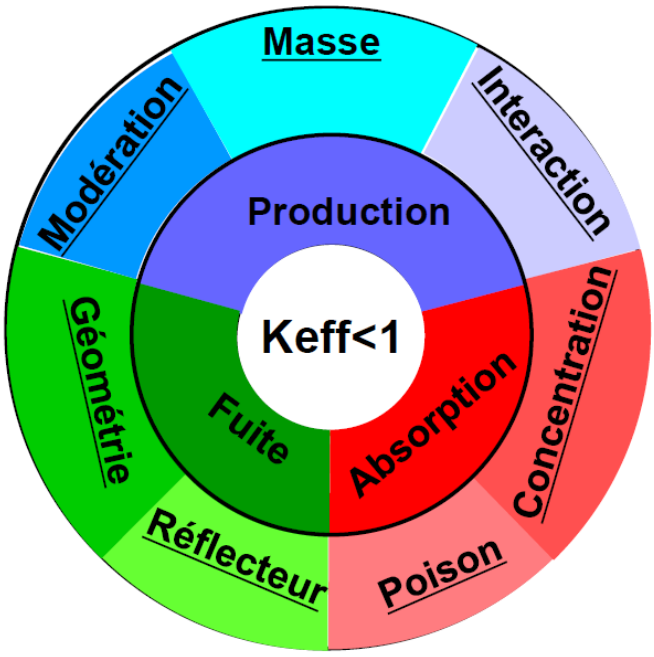
- De **volume minimal critique** (sphère) ;
- De **diamètre minimal critique** (cylindre) ;
- D'**épaisseur minimale critique** (plaque).

Nota : L'optimum de modération pour la géométrie est obtenu pour une valeur de H/X plus faible que pour l'optimum de modération pour la masse (voir fiches n°7 et 8).

**ATTENTION AUX CONDITIONS DE REFLEXION ET D'INTERACTION :**

Chaque courbe « Paramètre = ƒ(H/X) » est établie pour un système isolé (i.e. sans interaction) et pour des conditions de réflexion définies. Toute modification de ces conditions peut altérer la valeur de paramètre critique obtenue, voire déplacer l'optimum de modération.

## En résumé : les paramètres de la criticité




*Ce document, élaboré pour la réalisation d'études de sûreté-criticité, est la propriété du CEA. Il ne se substitue en aucun cas à une analyse de sûreté-criticité ou à l'avis d'un ingénieur criticien et ne peut pas servir de référence directe.*