# FICHE N°15

## RÉFLECTEURS




*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.*

## Définitions

⇨ **Réflecteur :** matériau qui, lorsqu'il est à proximité d'un milieu fissile, a la propriété de renvoyer dans le milieu une partie des neutrons qui s'en échappent. La présence de ce type de matériau tend à augmenter les valeurs de $k_{eff}$ et à diminuer les valeurs des paramètres critiques.

⇨ **Épaisseur saturante de réflecteur :** les valeurs des paramètres critiques diminuent lorsque l'épaisseur du réflecteur augmente (i.e. l'augmentation de l'épaisseur du réflecteur augmente le $k_{eff}$ du milieu fissile considéré). Toutefois, **au delà d'une certaine épaisseur, dite « saturante », les valeurs critiques restent sensiblement constantes**. Cette épaisseur, calculée pour une configuration de matière fissile sous forme de sphère, est par exemple de l'ordre de :

- 20 cm pour l'eau ;
- 60 cm pour le béton « standard ».

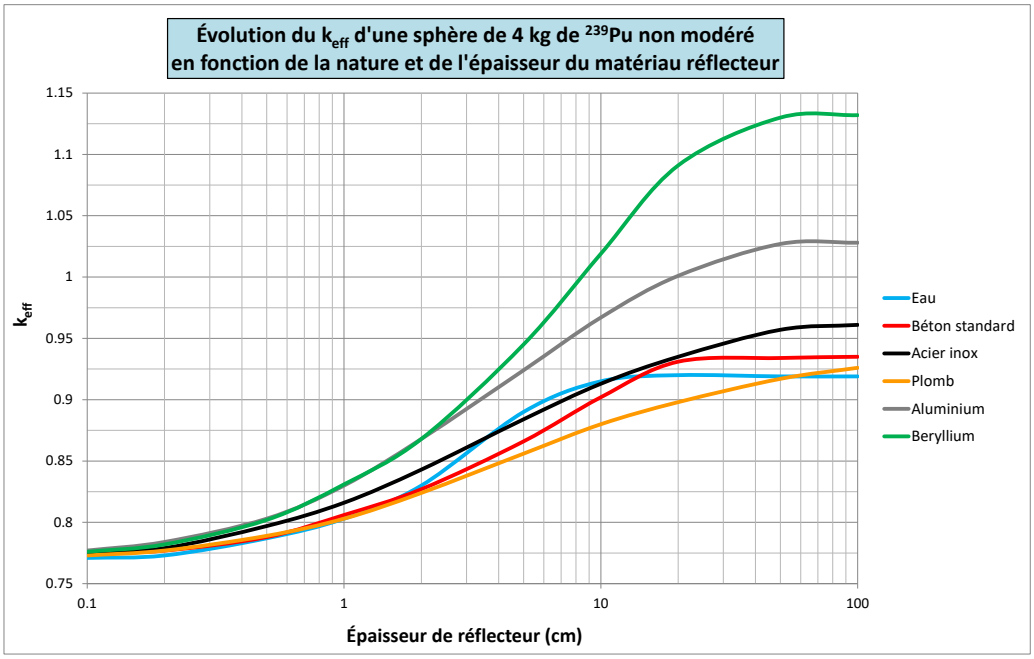
## Matériaux réflecteurs

⇨ Une partie des neutrons ayant fui le milieu fissile, y revient après diffusion dans les matériaux de l'environnement immédiat de l'équipement contenant le milieu fissile (matériaux de structure, cloisons, machines, personnel…). La diffusion est favorisée si le matériau est constitué de corps légers (H, C, Be…) ou s'il est dense et épais ($U_{nat}$, Fe…) et si sa section efficace de capture est faible.

⇨ **L'eau**, habituellement utilisée comme référence dans l'établissement des normes de criticité, majore l'effet de réflexion pour de nombreux matériaux, excepté pour (liste non exhaustive) :

- De nombreux métaux (plomb, fer, acier, cuivre…) et oxydes métalliques ($Al_2O_3$, MgO…) ;
- Le béton ;
- Le graphite ;
- Le polyéthylène ($CH_2$) ;
- L'uranium naturel ;
- L'eau lourde ;
- Le béryllium ;
- ...

⇨ De manière générale, **il est difficile de se prononcer sur le pouvoir réflecteur des matériaux, d'autant que celui-ci varie selon l'épaisseur de matériau** (cf. courbes ci-dessous) **et le milieu fissile en présence**.




cf. NCSD 2005 : E. GAGNIER et al., *Neutronic reflector classifications for moderated and unmoderated fissile media*

*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 réflecteurs usuels*

⇨ **L'eau :**

- Une **réflexion par 2,5 cm d'eau** majore les réflexions apportées par les **mains d'un opérateur** : on parle de **réflexion nominale**. Elle permet de prendre en compte la réflexion apportée par l'**environnement proche** de l'équipement, les tuyauteries… sous réserve qu'il n'y ait pas de matériaux réflecteurs « massifs » à proximité. Elle peut être utilisée dans les locaux où le risque d'inondation/aspersion est exclu ;
- En présence de matériaux de calorifugeage ou de serpentins de circuits d'eau, il est nécessaire de justifier que la prise en compte, dans les calculs de criticité, d'une couche d'eau de 2,5 cm, est enveloppe au regard du risque de criticité ; à défaut, une étude spécifique doit être réalisée. Par exemple, il est possible de retenir une épaisseur d'eau égale au diamètre du serpentin + 2,5 cm ;
- Une **réflexion par 20 cm d'eau** majore les réflexions apportées par l'essentiel des matériaux présents dans une installation (elle est quelquefois nommée abusivement **réflexion totale**).

⇨ **Le béton :**

- Ce réflecteur peut être utilisé pour les **cellules en béton** et les **entreposages** (modélisation des murs, du sol, du plafond) ;
- Il faut porter une attention particulière à la composition réelle du béton (notamment, sa **densité** et sa **teneur massique en eau**) et la comparer, dans la mesure du possible, à celle prise en compte dans les calculs. Historiquement, le béton « standard » utilisé dans les calculs de criticité comporte une teneur en eau de 8,93% et une densité de 2,3. Cependant, un béton asséché peut être, dans certaines configurations, plus pénalisant. Dans les règles de l'art, il est ainsi recommandé d'étudier des configurations de calcul avec une **teneur en eau du béton variable de 3% à 8,93%**.
- L'épaisseur saturante, prise en compte dans les calculs de normes, est de :
  - **60 cm** pour le béton de teneur massique en eau égale à **8,93%** (béton dit « standard »),
  - **100 cm** pour le béton de teneur massique en eau égale à **3%** ;
- Dans certains calculs de criticité, la prise en compte de la réflexion par du béton peut se faire en décrivant, par exemple les murs de cellule contenant l'équipement étudié. Pour être pénalisant vis-à-vis du risque de criticité, les épaisseurs des murs doivent, au moins, être égales à l'épaisseur saturante précitée ;
- Dans certaines notes anciennes, le béton est simulé par un « albédo » (artifice mathématique des codes de calculs de criticité permettant d'éviter de simuler l'épaisseur réelle de matériau). Cette option est à considérer avec précaution : elle ne couvre pas systématiquement les cas des bétons faiblement hydrogénés et peut être aussi fortement pénalisante dans le cas où la matière fissile est au contact ou très proche du béton. Aussi, dans ces cas, il est préférable de simuler les murs, sol et plafond des cellules tels que construits, en prenant en compte la composition pénalisante du béton au regard du risque de criticité.

⇨ **Le plomb :**

- Ce réflecteur peut être utilisé pour les **cellules avec parois en plomb**, les **emballages de transport**, certains **conteneurs**...
- L'épaisseur saturante du plomb étant très élevée (1 à 2 m), les calculs de normes prennent généralement en compte une épaisseur standard de **25 cm de plomb suivis de 20 cm d'eau**.

⇨ Les réflecteurs cités précédemment couvrent la majorité des matériaux rencontrés dans les installations. Ils sont considérés dans les notes de calculs de normes usuelles. **Cependant, la présence de tout autre matériau réflecteur doit être étudiée avec attention.**

*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.*

## *Valeurs usuelles : calculs de normes*

⇨ Le tableau ci-après présente, à titre d'exemple, des résultats de calculs de normes (valeurs à $k_{eff}$ = 0,95 et 1) pour différents milieux métalliques, dans les conditions usuelles de réflexion :

- 2,5 cm d'eau ;
- 20 cm d'eau ;
- 60 cm de béton à 8,93 % d'eau ;
- 100 cm de béton à 3 % d'eau ;
- 25 cm de plomb suivis de 20 cm d'eau.

| Milieu fissile de référence | Réflecteur | Valeurs maximales admissibles : $k_{eff}$ = 0,95 | | | | Valeurs minimales critiques : $k_{eff}$ = 1 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Masse (kg) | Diamètre de cylindre (cm) | Épaisseur de plaque (cm) | Volume (L) | Masse (kg) | Diamètre de cylindre (cm) | Épaisseur de plaque (cm) | Volume (L) |
| U métal homogène Enrichissement : 5% Modérateur : $H_2O$ *(cf. note SERMA/CP2C/NT/17-6186/A)* | 2,5 cm $H_2O$ | 32,8 | 25,1 | 13,5 | 23,3 | 44,0 | 27,5 | 15,0 | 30,2 |
| | 20 cm $H_2O$ | 25,4 | 21,0 | 9,19 | 16,3 | 34,5 | 23,4 | 10,7 | 21,7 |
| | 60 cm béton à 8,93% | 22,1 | 18,8 | 5,81 | 14,1 | 29,7 | 20,9 | 7,01 | 18,5 |
| | 100 cm béton à 3% | 22,8 | 18,7 | 4,74 | 15,0 | 30,3 | 20,6 | 5,75 | 19,4 |
| | 25 cm Pb + 20 cm $H_2O$ | **19,2** | **17,5** | **4,70** | **13,0** | **25,4** | **19,2** | **5,43** | **16,7** |
| Pu métal homogène Isotopie : $^{239}Pu$ Modérateur : $H_2O$ *(cf, note SERMA/CP2C/NT/17-6169/A)* | 2,5 cm $H_2O$ | 0,534 | 5,29 | 1,79 | 0,310 | 0,668 | 5,66 | 1,98 | 0,371 |
| | 20 cm $H_2O$ | 0,403 | 4,25 | 0,646 | 0,226 | 0,509 | 4,59 | 0,783 | 0,274 |
| | 60 cm béton à 8,93% | 0,354 | **3,91** | 0,279 | **0,214** | 0,441 | **4,14** | 0,346 | **0,253** |
| | 100 cm béton à 3% | 0,369 | 3,96 | **0,210** | 0,232 | 0,457 | 4,18 | **0,259** | 0,274 |
| | 25 cm Pb + 20 cm $H_2O$ | **0,305** | 4,10 | 0,494 | 0,236 | **0,375** | 4,34 | 0,543 | 0,281 |

⇨ Ces résultats montrent que **le réflecteur pénalisant peut dépendre du milieu fissile de référence et du mode de contrôle** :

- Pour le milieu U métal enrichi à 5% modéré par de l'eau, le réflecteur constitué par 25 cm de plomb suivis de 20 cm d'eau est pénalisant pour tous les paramètres étudiés ;
- Pour le milieu $^{239}Pu$ métal modéré par de l'eau, le réflecteur pénalisant dépend du mode de contrôle :
  - Pour la masse : 25 cm de plomb + 20 cm d'eau,
  - Pour le volume sphérique et le diamètre de cylindre : 60 cm de béton à 8,93% d'eau,
  - Pour l'épaisseur de plaque : 100 cm de béton à 3% d'eau.
- Cette hiérarchisation ne dépend pas du critère de $k_{eff}$ retenu.

☞ *Pour plus d'informations sur les calculs de normes : voir fiche n°6*

*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.*

## *Manipulations de faibles quantités de matières*

⇨ La note CSIA 71-402 fournit des quantités maximales de matières fissiles et de réflecteurs qu'il est possible de rassembler dans un local :

- **375 g de $^{239}$Pu** ou **375 g d'$^{233}$U** ou **600 g d'$^{235}$U** (enrichissement > 6 %) ou **1,2 kg d'$^{235}$U** (enrichissement compris entre 1 et 6 %) ;
- À condition qu'aucune des dimensions intérieures de l'enceinte ne soit inférieure à 1 m
- À condition que les matériaux suivants soient limités à **5 kg de béryllium** ou **30 kg de graphite** ou **50 kg d'eau lourde** ou **200 kg de plomb** ;
- Si aucune des conditions précédentes n'est remplie, la masse de matière fissile sera limitée à **150 g** ;
- Si des matières fissiles de nature différente sont présentent, la somme des fractions obtenus en divisant la masse de chacune d'elles par la limite correspondante, citée plus haut, sera au plus égale à l'unité ;
- S'il existe, en outre, de l'uranium à une teneur en uranium 235 inférieure ou égale à 1 %, il sera tenu en compte dans la loi de composition précédente sur la base d'une limite de 12 kg d'uranium 235.

⇨ **Ces résultats sont à utiliser avec la plus grande prudence**. En effet, des calculs plus récents, consignés dans la note SERMA/CP2C/RT/05-3571/A, montrent que certaines configurations conduisent à un **$k_{eff}$ supérieur à 0,95, voire sur-critique**.

⇨ Pour les réflecteurs précités, à l'épaisseur saturante, la note a permis de déterminer les masses minimales critiques et maximales admissibles ($k_{eff}$ = 0,92 et 0,95) pour 4 milieux fissiles :

| | Pu métal à 100% en $^{239}$Pu | | | U métal à 100% en $^{233}$U | | | U métal à 6% en $^{235}$U | | | U métal à 93,5% en $^{235}$U | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $k_{eff}$ / Réflecteur | 0,92 | 0,95 | 1 | 0,92 | 0,95 | 1 | 0,92 | 0,95 | 1 | 0,92 | 0,95 | 1 |
| 100 cm de Be | 105 | 119 | 147 | 133 | 147 | 175 | 4849 | 5671 | 7404 | 188 | 212 | 259 |
| 20 cm d'eau | 346 | 397 | 501 | 405 | 457 | 558 | 16185 | 19180 | 25753 | 589 | 675 | 844 |
| 200 cm d'eau lourde | 171 | 193 | 236 | 217 | 241 | 285 | 7375 | 8549 | 11081 | 301 | 339 | 410 |
| 200 cm de graphite | 133 | 150 | 184 | 169 | 188 | 223 | 5978 | 6954 | 9077 | 236 | 266 | 322 |
| 200 cm de plomb | 213 | 240 | 293 | 274 | 303 | 358 | 9932 | 11590 | 15016 | 383 | 429 | 523 |
| 50 cm d'U à 1% en U235 | 179 | 211 | 277 | 226 | 260 | 329 | 8666 | 10643 | 14983 | 318 | 373 | 486 |

**Masses [g] admissibles et critiques d'U ou de Pu en fonction du réflecteur à l'épaisseur saturante et du milieu fissile de référence**

## *Présence de réflecteurs plus pénalisants que l'eau : « règle des mélanges de réflecteurs »*

⇨ **Certains matériaux sont plus réflecteurs que l'eau** (voir page 1). Une solution simple permettant d'en tenir compte consiste à prendre en compte le plus pénalisant des réflecteurs en présence, à son épaisseur saturante, pour déterminer les limites de sûreté-criticité.

⇨ Pour des unités de travail en **mode de contrôle par la masse et, éventuellement, par la modération**, afin d'éviter d'aboutir à des limites très contraignantes, il est possible de gérer la présence de matériaux plus réflecteurs que l'eau en limitant leur quantité et en utilisant une « **règle des mélanges de réflecteurs** », à établir par calcul.

**Exemple : gestion des matériaux plus réflecteurs que l'eau dans l'INB 148 (ATALANTE) :**

⇨ Le milieu fissile de référence est le $^{239}$Pu métal modéré par de l'eau.

⇨ Le mode de contrôle généralement retenu est la masse, avec une limite de masse égale à 350 g de Pu par unité de travail.

⇨ En présence de différents réflecteurs en quantité limitée, la sûreté-criticité est assurée si : $\sum_i \left( \frac{m_{Ri}}{m_{Ri\,lim}} \right) \leq 1$, avec :

- $m_{Ri}$ : masse du réflecteur i présent en quantité non négligeable dans le périmètre ;
- $m_{Ri\,lim}$ : masse limite autorisée du réflecteur i lorsqu'il est seul (valeurs du référentiel d'ATALANTE, par ex. 200 kg pour Pb).

⇨ Cette gestion implique un suivi comptable des quantités de réflecteurs introduites dans chaque unité de travail concernée.

*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.*