# FICHE N°25

## QUELQUES « PIÈGES » CLASSIQUES 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.*

## Préambule

⇨ Cette fiche-guide constitue un recueil de « pièges » susceptibles d'être rencontrés par un ingénieur lors de la réalisation d'une analyse de sûreté-criticité ou lors de la spécification de calculs de criticité.

⇨ Chaque « piège » fait l'objet d'une partie spécifique comprenant :

- Un postulat communément admis (titre de chaque partie) ;
- Un/des contre-exemple(s) à ce postulat et éventuellement, des explications.

⇨ Cette liste ne se veut pas exhaustive et pourra être enrichie dans une révision ultérieure de la fiche.

## Sommaire

1. « Le plutonium est plus pénalisant que l'uranium. »
2. « Pour l'uranium, il est pénalisant de maximiser l'enrichissement en $^{235}$U. »
3. « Il est pénalisant de considérer la composition du combustible avant irradiation. »
4. « Il est pénalisant de considérer la densité maximale de la matière fissile. »
5. « La modération par de l'eau est la plus pénalisante. »
6. « Le réflecteur {25 cm de plomb + 20 cm d'eau} est le plus pénalisant. »
7. « Il est pénalisant de ne pas considérer les parois en acier des équipements. »
8. « Utiliser une valeur sûre procure une grande marge par rapport à l'état critique. »

*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.*

## Piège n°1 : « Le plutonium est plus pénalisant que l'uranium. »

⇨ C'est généralement vrai, mais cela peut dépendre :

- De l'isotopie du plutonium et de l'uranium ;
- Des modes de contrôle de la criticité ;
- De la forme physico-chimique.

Exemple 1 : Comparaison entre le $^{239}$Pu et l'U enrichi à 93,5%, sous forme métal ou nitrate, modérés par de l'eau :

| Milieu fissile | Valeurs minimales critiques ($k_{eff}$ = 1), réflexion par 20 cm d'eau | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Masse (kg) | Diamètre de cylindre (cm) | Épaisseur de plaque (cm) | Volume (L) |
| $^{239}Pu$-$H_2O$ | **0,509** | **4,59** | **0,783** | **0,274** |
| U(93,5%)-$H_2O$ | 0,850 | 8,02 | 1,74 | 1,28 |
| $^{239}Pu(NO_3)_3$-$H_2O$ | **0,519** | **15,3** | **5,57** | 7,21 |
| $U(93,5\%)O_2(NO_3)_2$-$H_2O$ | 0,881 | **15,3** | 5,66 | **7,07** |

*(réf. : notes SERMA/CP2C/NT/17-6169/A, NT/16-6014/A, NT/2018-62804/A, NT/2018-62537/A)*

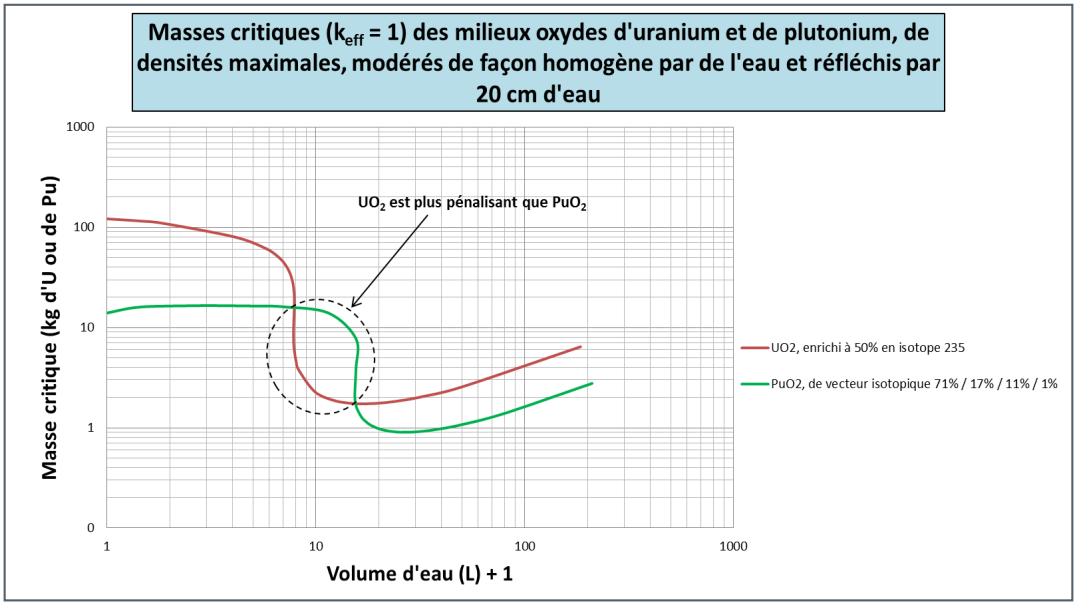
⇨ **Milieux de type « métal » (Pu-$H_2O$ et U-$H_2O$) :**

- En mode de contrôle par la masse ou par la géométrie (seule) : les valeurs minimales critiques sont toujours plus faibles pour le Pu. Le milieu fissile de référence à retenir est alors le Pu-$H_2O$.

⇨ **Milieux de type « nitrate » (nitrate de Pu(III) et nitrate d'U(VI)) :**

- En mode de contrôle par la masse : le milieu fissile de référence à retenir est le $Pu(NO_3)_3$-$H_2O$ ;
- En mode de contrôle par la géométrie : le milieu fissile de référence à retenir dépend de la forme géométrique considérée.

Exemple 2 : Comparaison entre l'$UO_2$ (50 % en $^{235}$U) et le $PuO_2$ (17 % de $^{240}$Pu) modérés par de l'eau (voir fiche n°4) :




- En mode de contrôle par la masse seule : la valeur minimale critique de masse est plus faible pour le $PuO_2$ que pour l'$UO_2$. Le milieu fissile de référence à retenir est alors le $PuO_2$-$H_2O$ ;
- En mode de contrôle par la masse associée à la modération : il existe une plage de modération, comprise entre 7 et 15 L d'eau environ, pour laquelle l'$UO_2$ est plus pénalisant que le $PuO_2$. Le milieu fissile de référence à retenir est alors, pour cette plage de modération, l'$UO_2$-$H_2O$.

*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.*

## Piège n°2 : « Pour l'uranium, il est pénalisant de maximiser l'enrichissement en $^{235}$U. »

⇨ C'est généralement vrai, mais cela peut dépendre de la nature du combustible et du mode de contrôle de la criticité.

⇨ **Cas des combustibles irradiés à base de thorium :**

- L'irradiation du $^{232}$Th conduit, après refroidissement, à la formation d'**$^{233}$U**.
- Cet isotope peut être plus pénalisant que l'$^{235}$U, comme l'illustre par exemple le tableau suivant (calculs de normes pour des milieux métalliques modérés par de l'eau et réfléchis par 20 cm d'eau) :

| Milieu fissile | Masse minimale critique d'U | Diamètre de cylindre minimal critique |
|---|---|---|
| U métal pur en isotope 233 + $H_2O$ | 559 g | 4,94 cm |
| U métal enrichi à 93,5% en $^{235}$U + $H_2O$ | 850 g | 8,02 cm |

*(réf : notes SERMA/CP2C/NT/16-6014/A et 17-6196/A)*

⇨ **Cas des milieux mixtes :**

- Dans certains cas (milieux secs ou faiblement modérés en particulier), **à masse d'$^{235}$U égale**, il peut être plus pénalisant de minimiser l'enrichissement en $^{235}$U : en effet, ceci revient à augmenter la masse d'$^{238}$U et peut augmenter la valeur de $k_{eff}$ (augmentation de la réflexion / des interactions entre équipements...).
- Dans ce cas, il est conseillé de faire varier l'enrichissement en $^{235}$U entre ses valeurs minimales et maximales possibles, et de retenir la valeur conduisant aux limites de sûreté-criticité les plus restrictives.

## Piège n°3 : « Il est pénalisant de considérer la composition du combustible avant irradiation. »

⇨ C'est généralement vrai, mais cela peut dépendre de la nature du combustible et du type de réacteur dans lequel il a été irradié.

⇨ Cas des combustibles contenant un poison consommable :

- Certains combustibles contiennent un poison neutronique consommable : c'est par exemple le cas des assemblages REB contenant des crayons d'oxyde de gadolinium.
- Dans ce cas, si le poison consommable est pris en compte dans le milieu fissile, un pic de réactivité peut être observé pour les faibles combustions massiques. En effet, la présence de poison provoque un durcissement du spectre neutronique : les réactions avec des neutrons rapides sont privilégiées, la probabilité de fission de l'$^{235}$U est diminuée alors que la création de $^{239}$Pu, par absorption neutronique de l'$^{238}$U, est favorisée.

*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.*

⇨ Cas des couvertures fertiles des réacteurs à neutrons rapides :

- Dans ces combustibles, les teneurs en matières fissiles sont d'autant plus élevées que l'irradiation est importante : en effet, (production de plutonium riche en $^{239}$Pu à partir des éléments de couverture en uranium naturel ou appauvri).
- Par conséquent, il convient, pour ces couvertures, de retenir la teneur en matières fissiles générée dans cette zone en prenant en considération la combustion massique maximale du cœur fissile. Cette valeur enveloppe doit tenir compte des incertitudes affectant les résultats fournis par l'exploitant du réacteur.

## Piège n°4 : « Il est pénalisant de considérer la densité maximale de la matière fissile. »

⇨ C'est toujours vrai lorsque le milieu fissile constitue un **milieu isolé** ou découplé neutroniquement des autres milieux fissiles.

⇨ **Cela peut être faux dans le cas de milieux en interaction** : en effet, deux effets s'opposent lorsque l'on procède à une diminution de la densité de la matière fissile dans une géométrie donnée :

- Augmentation des fuites hors de chaque milieu pris isolément → $k_{eff}$ ↘ ;
- Augmentation du nombre de fissions dans les autres milieux en interaction → $k_{eff}$ ↗.

⇨ **L'effet prépondérant dépend de la configuration géométrique** : il n'est donc pas possible de définir de règle générale. Ainsi, dans le cas d'équipements en interaction, en mode de contrôle par la masse et la géométrie (a minima), il convient de s'interroger sur la densité à retenir pour la matière fissile. Des calculs paramétriques faisant varier la densité peuvent être réalisés à cet effet.

## Piège n°5 : « La modération par de l'eau est la plus pénalisante. »

⇨ Dans les études de sûreté-criticité, il est souvent tenu compte d'une modération par de l'eau pour simuler l'effet des matériaux au voisinage de la matière fissile. Cependant, ce choix n'est pas toujours pénalisant.

⇨ **Cas des matières plastiques :**

- Les matières plastiques contiennent des chaînes carbonées modératrices (éléments H et C).
- Dans les calculs, elles sont souvent assimilées à du polyéthylène ($CH_2$) de densité maximale (0,96), dont la concentration en hydrogène par cm$^3$ est plus grande que celle de l'eau.
- **Dans un certain nombre de cas, le $CH_2$ est alors meilleur modérateur que l'eau** et il faut en tenir compte lors de la définition du milieu fissile de référence ; c'est vrai en particulier en mode de contrôle par la masse.
- Le caractère pénalisant de l'eau peut cependant être argumenté dans certains cas, en tenant compte :
  - ♦ De la composition réelle de la matière modératrice : par exemple, si le matériau contient des atomes absorbants (azote (N), chlore (Cl)…),
  - ♦ De la densité maximale de la matière modératrice : par exemple, pour du Pu métal pur en isotope 239, en mode de contrôle par la masse, le $CH_2$ devient moins pénalisant que l'eau dès lors que sa densité est inférieure ou égale à 0,75 (cf. note SERMA/CP2C/NT/17-6251/A).

  Des calculs comparatifs entre l'eau et la matière modératrice réelle, tenant compte des modes de contrôle de la criticité retenus dans l'analyse, sont nécessaires pour établir ce type d'argumentaire.

⇨ **Cas du graphite :**

- Le graphite (C) est en général moins modérateur que l'eau, sauf :
  - ♦ Pour des milieux à spectre rapide (faible teneur en $^{235}$U),
  - ♦ Lorsque la justification de sûreté-criticité est fondée sur une limitation de densité surfacique (voir fiche n°14).

*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.*

## Piège n°6 : « Le réflecteur {25 cm de plomb + 20 cm d'eau} est le plus pénalisant. »

⇨ Ce réflecteur est souvent pénalisant (i.e. il conduit à des limites de sûreté-criticité plus pénalisantes) en comparaison des réflecteurs « classiques » (eau, béton). **Il existe cependant des exceptions** :

- Pour les milieux « réactifs » (Pu, U très enrichi), en mode de contrôle par la géométrie, une épaisseur saturante de béton (1 m) peut être plus pénalisante (voir fiche n°15, page 3) ;
- Les valeurs d'épaisseur de plaque sont généralement plus pénalisantes avec une réflexion par 1 m de béton à 3% d'eau.

⇨ Il existe d'autres réflecteurs plus pénalisants que le plomb. Par exemple, à l'épaisseur saturante, le **béryllium**, le **magnésium** ou encore le **graphite** conduisent à des limites de masses critiques nettement plus faibles (cf. article NCSD 2005 : E. GAGNIER et al., *Neutronic reflector classifications for moderated and unmoderated fissile media*).

⇨ En cas de doute, une bonne pratique permettant d'avoir une idée des conditions de réflexion les plus pénalisantes consiste à **comparer les résultats issus de calculs de normes**, compte tenu du mode de contrôle de la criticité retenu.

## Piège n°7 : « Il est pénalisant de ne pas considérer les parois en acier des équipements. »

⇨ C'est généralement vrai lorsque les **épaisseurs d'acier** concernées sont **faibles** (de l'ordre de **quelques mm**). En effet, des absorptions ont lieu dans l'acier et conduisent donc à diminuer la valeur de $k_{eff}$ d'un système. De plus, l'acier permet de diminuer la réflexion par l'eau ou l'interaction entre équipements.

⇨ Cependant, **l'acier est également un bon réflecteur neutronique** (voir fiche n°15). Pour des épaisseurs plus élevées, cet effet peut devenir prépondérant et augmenter le $k_{eff}$.

⇨ **L'effet prépondérant dépend de la configuration géométrique** : il n'est donc pas possible de définir de règle générale. Toutefois, pour des épaisseurs de quelques mm, l'effet absorbant est généralement prépondérant. Au-delà de 10 cm, l'effet réflecteur est prépondérant. Entre ces deux valeurs, il est conseillé de faire varier l'épaisseur d'acier dans la plage de valeurs possibles (en particulier, prise en compte des tolérances de fabrication).

## Piège n°8 : « Utiliser une valeur sûre procure une grande marge par rapport à l'état critique. »

⇨ C'est généralement vrai pour des milieux « réactifs » (Pu ; U enrichi à 10% et au-delà), pour lesquels la valeur sûre conduit généralement à un $k_{eff}$ inférieur à 0,95 (valeur usuelle en configuration normale). En effet, historiquement, les coefficients de sécurité ont été définis pour ces types de milieux.

⇨ En revanche, **la marge de sûreté procurée par l'utilisation d'une valeur sûre peut être insuffisante dans le cas de milieux peu réactifs**, en particulier, pour l'uranium très peu enrichi (voir fiche n°2). À titre illustratif, le tableau suivant, basé sur des résultats de calculs de normes, présente le $k_{eff}$ correspondant aux valeurs de masses sûres pour de l'uranium métal très peu enrichi, modéré par de l'eau et réfléchi par 20 cm d'eau.

| Enrichissement en $^{235}U$ | Masse minimale critique ($k_{eff}$ = 1) | Masse sûre (masse critique x 0,7) | $k_{eff}$ correspondant à la masse sûre | Masse maximale admissible pour $k_{eff}$ = 0,95 |
|---|---|---|---|---|
| 1,50 % | ~ 710 kg d'U | ~ 490 kg d'U | **0,974** | ~ 370 kg d'U |
| 1,05 % | ~ 18 t d'U | ~ 13 t d'U | **0,995** | ~ 2,5 t d'U |
| 1,01 % | ~ 74 t d'U | ~ 52 t d'U | **0,998** | ~ 3,6 t d'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.*