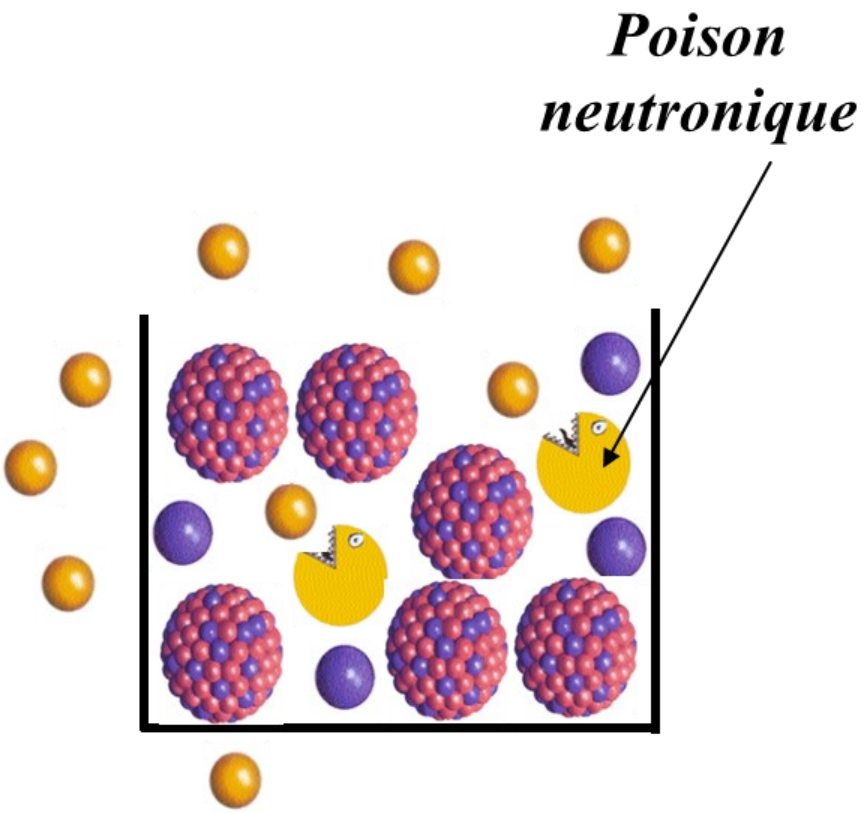
FICHE N°13

MODE DE CONTRÔLE DE LA CRITICITÉ PAR L'EMPOISONNEMENT NEUTRONIQUE



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.

FICHE-GUIDE DE CRITICITÉ N°13

MODE DE CONTRÔLE DE LA CRITICITÉ PAR L'EMPOISONNEMENT NEUTRONIQUE

Domaine d'application

⇨ Le **mode de contrôle de la criticité par l'empoisonnement** est très rarement utilisé seul ; il est **souvent associé au contrôle par la masse** (voir fiche n°7), **la géométrie** (voir fiche n°8) **ou la concentration** (voir fiche n°9) dans le but d'augmenter la limite du mode de contrôle auquel il est associé (respectivement, une masse de matières fissiles, des dimensions géométriques ou une concentration en matières fissiles).

⇨ Il est par exemple utilisé quand le procédé nécessite :

- La manipulation de quantités importantes de matières fissiles sans pouvoir limiter leur modération ;
- L'utilisation d'appareils de grand volume ne pouvant pas être conçus en géométrie sûre ;
- Le découplage neutronique d'appareils entre eux.

⇨ Il peut être utilisé comme mode de contrôle secondaire pour certaines configurations anormales.

Rappels et définitions

⇨ **Empoisonnement neutronique** : diminution du k_{eff} d'un milieu fissile par la présence d'éléments absorbant les neutrons (capture sans fission) : voir fiche n°1.

⇨ **Poisons neutroniques** : matériaux utilisés à dessein pour diminuer la réactivité d'un système. Les plus courants sont le **bore** (B), le **cadmium** (Cd), le **gadolinium** (Gd) et l'**hafnium** (Hf). **Leur efficacité augmente lorsque les neutrons sont modérés** : en effet, les sections efficaces de capture d'autant plus importantes que les neutrons du milieu sont modérés (voir fiche n°1). 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.

Paramètres

⇨ Le mode de contrôle de la criticité par l'empoisonnement est basé sur la garantie de la quantité de noyaux neutrophages. Il s'agit de contrôler :

- Leur **quantité** (ex : concentration en bore ou en gadolinium d'une solution, teneur en bore d'un acier...) ;
- Leur **qualité** (ex : teneur en isotope 10 du bore, en isotopes 155 et 157 du gadolinium...) ;
- Leur **localisation** par rapport à la matière fissile et l'environnement (répartition homogène dans une solution, présence sur une épaisseur minimale d'une structure…)

Dispositions garantissant le respect du mode de contrôle de la criticité

⇨ La principale imposition concerne la **garantie de la présence du poison neutronique** au cours de l'exploitation.

⇨ Il faut prêter attention à la **composition réelle des poisons utilisés**. En effet, souvent, seuls quelques isotopes de l'élément dit « poison neutronique » sont des absorbants neutroniques (ex : ^{10}B pour le bore). La composition réelle des poisons utilisés doit être comparée à celle prise en compte dans les calculs. Il convient de **préciser la teneur en isotope(s) neutrophage(s)** dans la démonstration de sûreté-criticité.

Exemple : verre borosilicaté :

- Données du fabricant : le verre contient 13 % de B_2O_3 ;
- Données prises dans les calculs de criticité pour une installation : PYREX contenant 13,5 % de B_2O_3.

Le pourcentage de bore pris en compte dans le calcul étant plus élevé que celui du matériau neutrophage de l'équipement, le k_{eff} obtenu par le calcul est donc plus faible qu'il ne l'est en réalité. Le calcul n'est donc pas enveloppe de la réalité.

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.

Empoisonnement neutronique homogène

⇨ L'empoisonnement neutronique homogène est assuré par la présence d'un **poison neutronique dissous** dans une solution contenant des matières fissiles.

⇨ Dans ce cas, la prévention du risque de criticité est garantie par le **respect d'une valeur de concentration en poison neutronique** dans la solution **supérieure à la concentration minimale admissible en poison neutronique** C_{poison}, compte tenu de la quantité (masse ou concentration) de matières fissiles présentes.

⇨ Ainsi, les dispositions à mettre en œuvre s'apparentent à celles du mode de contrôle par la concentration.

⇨ C_{poison} doit permettre de garantir un k_{eff} de la solution, en présence de poison neutronique, à une valeur inférieure à 1 avec une marge de sécurité suffisante (0,95 par exemple).

⇨ Le poison soluble doit « suivre » la solution de matières fissiles au cours de son traitement et de ses transferts, ce qui peut parfois poser des contraintes d'exploitation (nécessité de mettre en place une étape finale de séparation du poison neutronique des solutions du procédé).

⇨ Contraintes liées à l'empoisonnement homogène :

- Garantir l'**homogénéité du poison** et sa **non-dissociation de la matière fissile** : en particulier :
  - ♦ Exclure tout risque de précipitation ou de cristallisation du poison, mais aussi de la matière fissile si celle-ci est sous forme dissoute,
  - ♦ Exclure tout risque de dilution (sauf s'il est montré qu'une dilution du milieu reste admissible) : verrouillage des arrivée de fluides non empoisonnés, par exemple,
  - ♦ Connaître clairement la limite de solubilité du poison dans le milieu, et vérifier que C_{poison} retenue est inférieure à cette limite ;
- Disposer d'un **double contrôle de la concentration en poison** (par 2 méthodes différentes) pour s'assurer périodiquement de sa présence en quantité suffisante :
  - ♦ Dans la solution initiale (avant introduction dans la solution fissile, et en tenant compte du facteur de dilution dans cette dernière),
  - ♦ Dans la solution fissile elle-même.

Exemple d'application : reprise de dépôts plutonifères dans un équipement

⇨ Dans le cadre du démantèlement d'un dissolveur (de géométrie non sûre) contenant des dépôts humides avec de l'oxyde de plutonium (d < 3,5), il est envisagé de dissoudre ce plutonium dans une solution oxydante. Les hypothèses sont :

- Masse de Pu estimée (de manière enveloppe, compte tenu des incertitudes de mesure) : 10 kg ;
- Isotopie du Pu retenue : 71% / 17% / 11% / 1%.

⇨ Le tableau ci-contre présente les masses maximales admissibles de Pu (k_{eff} = 0,95) en fonction de la concentration en poison (bore ou gadolinium) dans la solution.

- La concentration minimale en poison à garantir est :
  - ♦ Avec le bore : C_B = 6 g/L,
  - ♦ Avec le gadolinium : C_{Gd} = 4 g/L ;
- Le gadolinium est ici plus « efficace » que le bore ;

⇨ Modes de contrôle de la criticité retenus :

- **MASSE** : $M_{Pu} \leq 10$ kg ;
- **EMPOISONNEMENT** : [B] ≥ 6 g/L ou [Gd] ≥ 4 g/L.

Poison	C(poison) [g/l]	H/Pu	M max. admissible [kg de Pu_t]
Bore	0	799	0,672
	1	299	2,00
	2	199	3,55
	4	109	7,11
	6	69	10,8
	8	5,97	14,2
	10	5,97	14,4
Gadolinium	0	799	0,672
	1	149	4,16
	2	99	6,72
	4	59	10,2
	6	44	12,5
	8	5,97	14,0
	10	5,97	14,2

Extrait de la note SERMA/CP2C/RT/11/5167/A (calcul de normes à k_{eff} = 0,95)

Nota : ce tableau montre qu'au-delà d'une certaine masse de Pu (ici, ~ 14 kg), l'ajout de poison n'est plus efficace : on parle communément de **« saturation » de l'effet du poison**.

Explication : l'ajout de poison permet surtout d'absorber les neutrons thermiques. A haute concentration, seuls subsistent les neutrons rapides, comme l'illustre le tableau ci-contre (H/Pu diminue quand C_{poison} augmente). Dans ce domaine d'énergie, la section efficace d'absorption du poison étant beaucoup plus faible, son ajout a alors peu d'impact.

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.

Empoisonnement neutronique hétérogène

⇨ L'empoisonnement neutronique hétérogène est assuré par la présence d'un **poison neutronique dans les matériaux de structures** d'un équipement recevant des solutions/des solides contenant des matières fissiles.

⇨ Dans ce cas, la prévention du risque de criticité est garantie par le **respect de la quantité en poison neutronique du matériau neutrophage**, par sa **localisation**, mais aussi très souvent par la **présence d'un matériau modérateur** (dans les conditions de géométrie définies dans le calcul de criticité) pour que le poison soit efficace.

⇨ Ainsi, les dispositions à mettre en œuvre s'apparentent à celles du mode de contrôle par la géométrie.

⇨ L'ensemble de ces conditions doit garantir le respect d'un k_{eff} de l'équipement à une valeur inférieure à 1 avec une marge de sécurité suffisante (0,95 par exemple)

⇨ L'empoisonnement hétérogène est souvent moins efficace que l'empoisonnement homogène (distance entre le poison et la matière fissile).

⇨ **IMPORTANT** : les **fiches de criticité** des équipements de géométrie sûre doivent également indiquer la composition réelle des éventuels poisons neutroniques présents dans les structures, ainsi que celle qui est prise en considération dans les calculs de criticité.

⇨ Contraintes liées à l'empoisonnement hétérogène :

- **Contrôle de qualité** pendant la fabrication, puis lors de la réception (PV de contrôle) :
  - Localisation du poison neutrophage (épaisseur de Cd par exemple),
  - Teneur en noyaux absorbants (^{10}B par exemple) ;
- **Vérification périodique de l'intégrité** (contrôle d'épaisseur, aspect d'anneaux de Raschig...) ;
- Prendre en compte les **risques d'agression** dans le dimensionnement :
  - Réactions chimiques / corrosion (gainage du cadmium dans un sandwich en acier, par exemple),
  - Manutentions au-dessus de l'équipement (mettre une protection ou interdire le survol),
  - Séisme (dimensionnement, de même que pour l'appareil en mode de contrôle par la géométrie),
  - Incendie (tenue au feu)...
- Consignes pour **proscrire le déplacement** du poison ou de la matière fissile, si l'un ou l'autre est mobile ;
- En général, **association d'un matériau modérateur** (hydrogéné) destiné à ralentir les neutrons lors de la mise en place d'écrans (plaques d'acier boré, polyéthylène...).

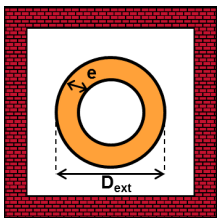
Nota : dans les installations de type « laboratoires et usines » (i.e. hors réacteurs), la disparition des poisons neutroniques par irradiation n'est pas significative sur la durée totale d'exploitation, compte tenu des faibles flux neutroniques mis en jeu.

Exemple d'application : dimensionnement d'une cuve annulaire

⇨ Dans le cadre d'un projet, un exploitant souhaite implanter une cuve de grand volume pour entreposer une solution de sels de plutonium très concentrée. Compte tenu de la forte réactivité du milieu et de la configuration du local (faible hauteur disponible), une cuve annulaire de géométrie sûre est retenue.

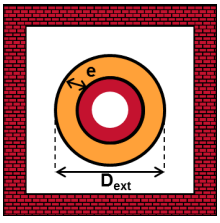
⇨ L'IQC spécifie des calculs de criticité visant à déterminer le diamètre externe de la cuve $\mathbf{D_{ext}}$ et l'épaisseur de la lame fissile **e** admissibles ($k_{eff} + 3\sigma \leq 0,95$).

- Pour un mode de contrôle par la géométrie seule :
  - e = 6,8 cm,
  - D_{ext} = 125 cm ;



- En y associant l'empoisonnement hétérogène par une feuille de 0,7 mm de Cd (poison) + 10 cm de paraffine (modérateur de type CH_2) :
  - e = 9,2 cm,
  - D_{ext} = 97 cm

⇨ **GAIN EN COMPACITÉ.**



⇨ Modes de contrôle de la criticité retenus :

- **GÉOMÉTRIE** : e ≤ 9,2 cm, D_{ext} ≥ 97 cm ;
- **EMPOISONNEMENT** : épaisseur de Cd ≥ 0,7 mm, composition du Cd, présence de la feuille de Cd en tout point en regard de la matière fissile ; de même pour la paraffine.

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.

BÉTON À LA COLÉMANITE

⇨ L'utilisation de la colémanite (borosilicate de calcium contenant 12% en masse de bore et 18% d'eau dans un ciment) permet de réaliser un béton qui peut être utilisé comme écran neutrophage. Sa formule théorique est la suivante : 2 CaO, 3 B_2O_3, 5 H_2O.

⇨ Ce mortier doit également présenter :

- Des caractéristiques mécaniques suffisantes ;
- Le maintien de ces caractéristiques, ainsi que des propriétés neutrophages, aux températures d'utilisation et sous irradiation pendant toute la durée de vie de l'équipement ou du conteneur de transport ;
- Une bonne fiabilité de mise en œuvre.

⇨ Pour les calculs de criticité, la composition standard, considérée comme enveloppe, en nombre d'atomes par cm^3 ($x10^{24}$), est la suivante :

- Si : $1{,}6640.10^{-4}$
- Al : $1{,}9604.10^{-3}$
- Fe : $5{,}0085.10^{-4}$
- Ca : $4{,}6504.10^{-3}$
- B (bore naturel) : $8{,}6253.10^{-3}$
- H : $2{,}1746.10^{-2}$
- O : $3{,}2487.10^{-2}$

Sa densité est de 1,5055.

⇨ Dans la mesure du possible, la composition du béton à la colémanite (ou béton boré) utilisée doit être justifiée ; à défaut, la composition enveloppe doit être retenue

⇨ L'utilisation du béton à la colémanite pour garantir la prévention du risque de criticité d'un équipement ou d'un conteneur de transport nécessite de garantir une bonne homogénéité de la répartition du couple hydrogène-bore. Des contrôles neutroniques peuvent être retenus.

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.