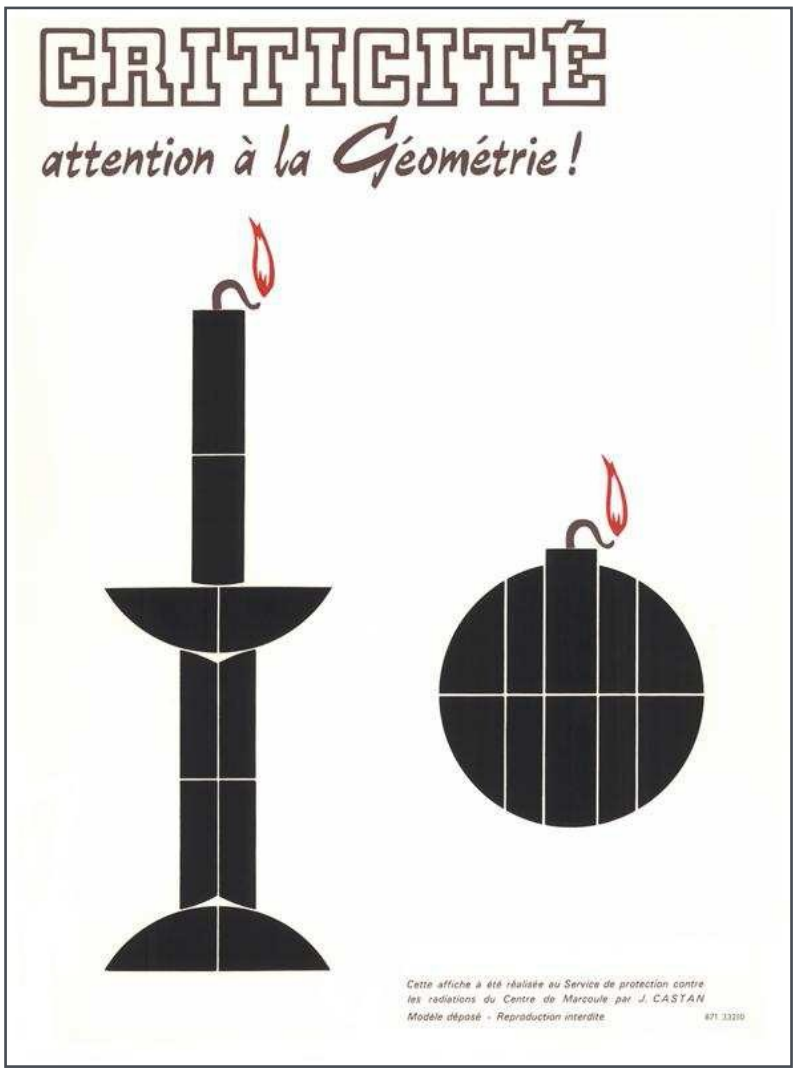
FICHE N°8

MODE DE CONTRÔLE DE LA CRITICITÉ PAR LA GÉOMÉTRIE



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.

Domaine d'application

⇨ Le **mode de contrôle de la criticité par la géométrie** n'impose pas aucune limitation de masse, de modération ou de concentration. Il est particulièrement adapté aux installations de traitement de **solutions concentrées en matières fissiles** et aux **entreposages de matières**.

⇨ En exploitation, il constitue une disposition de **sûreté passive**, qui limite les risques liés aux Facteurs Organisationnels et Humains (FOH). Il permet notamment de limiter les contrôles et les procédures administratives.

⇨ Il nécessite néanmoins de prendre certaines dispositions au niveau de la réalisation de l'équipement et lors de l'exploitation, ainsi que lors de la modification ou du changement éventuel de l'équipement.

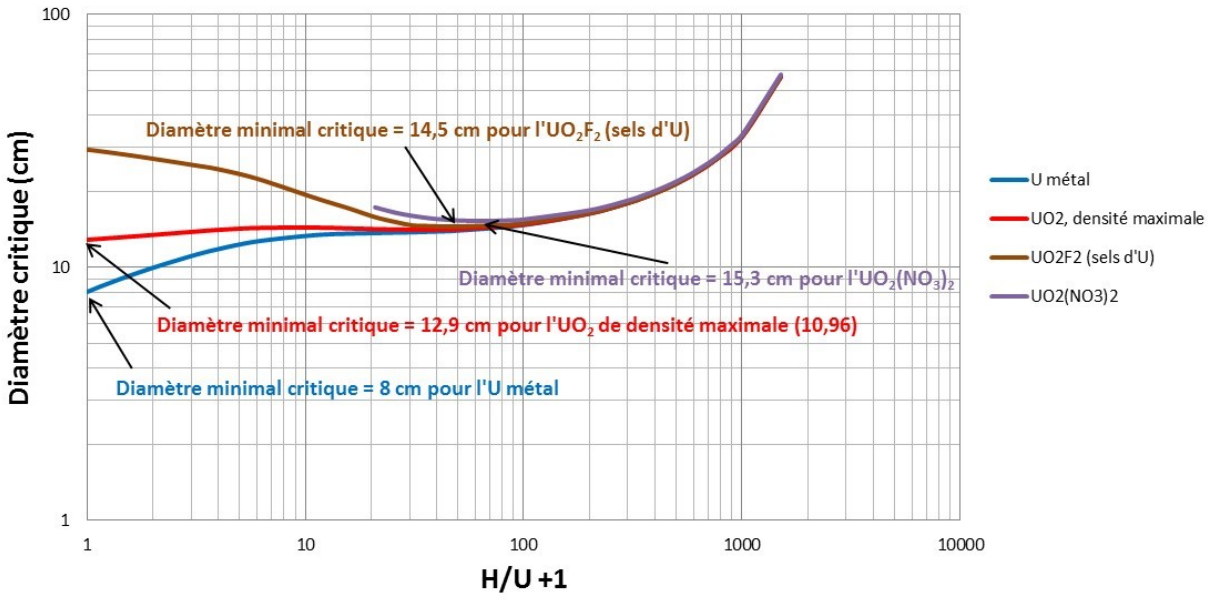
Paramètres

⇨ Le mode de contrôle de la criticité par la géométrie est basé sur le respect de dimensions inférieures à des **dimensions minimales critiques**. Ces dimensions correspondent au minimum de la courbe : dimension = f(H/X), pour k_{eff} = 1. Pour les formes géométriques simples, on parle de :

- **Volume de sphère minimal critique** : volume de sphère en dessous duquel un système est sous-critique quelles que soient la masse de matière fissile et la modération ;
- **Diamètre de cylindre minimal critique** : diamètre de cylindre de hauteur infinie en dessous duquel un système est sous-critique quelles que soient la masse de matière fissile et la modération ;
- **Épaisseur de plaque minimale critique** : épaisseur de plaque de surface infinie en dessous de laquelle un système est sous-critique quelles que soient la masse de matière fissile et la modération.

⇨ Ces valeurs sont fonction du **milieu fissile de référence** considéré (voir fiche n°4) et des **conditions de réflexion**.

Diamètres critiques (k_{eff} = 1) pour les milieux uranifères enrichis à 93,5% en ^{235}U, modérés de façon homogène par de l'eau et réfléchis par 20 cm d'eau



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.

Détermination des limites

⇨ Un **paramètre géométrique minimal critique** peut être déterminé, pour un réflecteur donné :

- En se reportant aux **normes** existantes, qui présentent les valeurs suivantes :
  - Le **paramètre minimal critique** (k_{eff} = 1),
  - Le **paramètre maximal admissible** : valeur du paramètre qui conduit à une valeur de k_{eff} donnée (critère d'admissibilité), inférieure à 1 : par exemple, 0,95,
  - Le **paramètre sûr** : valeur du paramètre en dessous duquel le milieu est garanti sous-critique avec une marge de sécurité appropriée, quelles que soient la masse de matière fissile et la modération. Elle est obtenue par la formule :
    - Pour le volume de sphère : $V_{sûr} = V_{critique} \times 0,75$
    - Pour le diamètre de cylindre : $Ø_{sûr} = Ø_{critique} \times 0,85$
    - Pour l'épaisseur de plaque : $e_{sûre} = e_{critique} \times 0,75$
- En traçant la courbe de variation du paramètre géométrique en fonction de la modération, pour k_{eff} = 1 (voir courbe ci-après pour les poudres, par exemple).

⇨ A partir de ces différentes valeurs, on peut définir les limites de sûreté-criticité et d'exploitation.

⇨ Enfin, il est souvent nécessaire de réaliser des **calculs spécifiques en modélisant les appareils** dont la sous-criticité ne peut être démontrée par l'utilisation simple des paramètres précédents. Ceci permet :

- D'obtenir le k_{eff} de l'appareil en dimensions finies ;
- De prendre en compte les interactions neutroniques et les réflexions apportées par d'autres appareils ou équipements dans l'environnement proche de celui étudié. Le k_{eff} calculé est alors celui de la configuration globale.

Un extrait d'une note (partie RÉSULTATS) est présenté ci-après à titre illustratif :
***SERMA/CP2C/NT/17-6186/A** : milieu U métal homogène (5 % ^{235}U, 95 % ^{238}U) modéré par de l'eau*

Critères d'admissibilité

TAB. 2: U métal homogène, d'enrichissement 5%, modéré de façon homogène par de l'eau – Réflexion par 20 cm d'eau

k_{eff} / Paramètre	0,90	0,93	0,95	0,97	1,0	Sûr	
Diamètre [cm]	18,9	20,1	21,0	21,9	23,4	19,9	
Epaisseur [cm]	7,81	8,61	9,19	9,79	10,7	8,06	
Volume [l]	12,3	14,5	16,3	18,2	21,7	16,3	
Masse [kg U]	18,9	22,5	25,4	28,6	34,5	24,1	14,8 (D.C)

Paramètres

Valeurs admissibles pour différents k_{eff}

Valeurs critiques

Valeurs sûres

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.

Nota : L'optimum de modération pour la géométrie dépend du milieu fissile de référence : pour les milieux uranifères par exemple, il est fonction de la forme physico-chimique et de l'enrichissement en ^{235}U.

Rappel : La marge de sécurité réelle, par rapport à l'état critique, dépend du comportement de la courbe de variation du k_{eff} en fonction du paramètre critique.

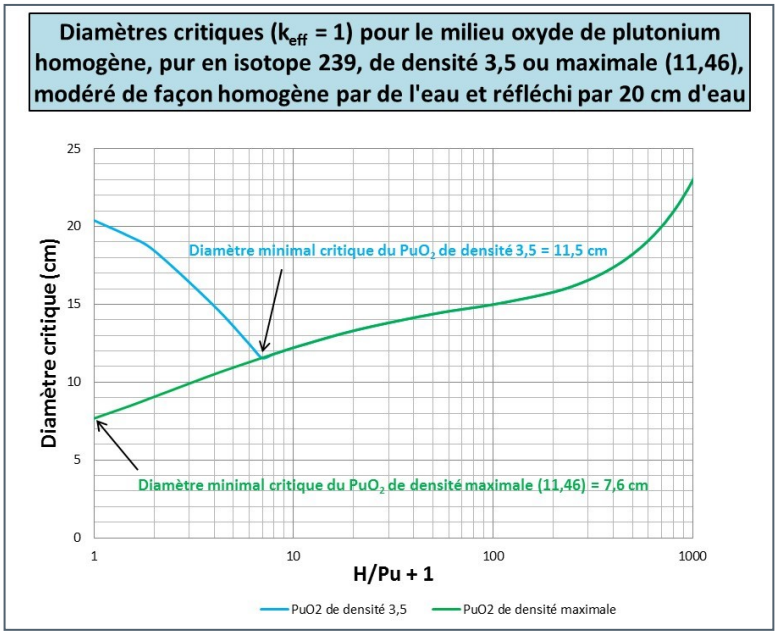
Ce document, élaboré pour la réalisation d'études de sûreté-criticité, est la propriété du CEA. Il ne se substitue en aucun cas à une analyse de sûreté-criticité ou à l'avis d'un ingénieur criticien et ne peut pas servir de référence directe.

Milieux « poudre »

⇨ Pour les milieux « poudre », **la valeur minimale critique d'un paramètre géométrique minimal critique dépend de la densité du produit sec**. Elle est obtenue à un point de la courbe appelé **troncature** de la loi de dilution, dont la position dépend de la densité. Au-delà du palier, le comportement est identique, l'effet de densité ne jouant plus.

☞ *Pour plus d'informations sur les lois de dilution « poudres » et la troncature : voir fiche n°5*

Diamètres critiques (k_{eff} = 1) pour le milieu oxyde de plutonium homogène, pur en isotope 239, de densité 3,5 ou maximale (11,46), modéré de façon homogène par de l'eau et réfléchi par 20 cm d'eau

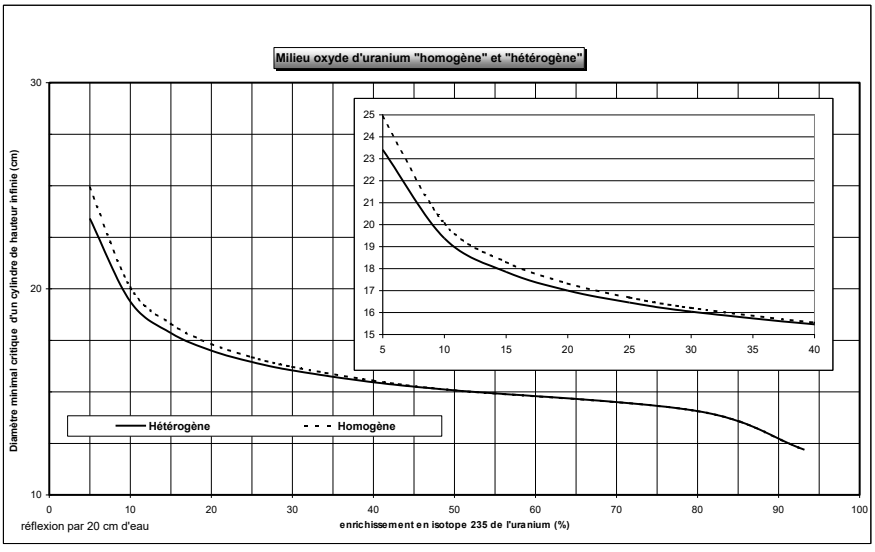


À retenir :
Contrairement à la masse minimale critique, **les paramètres minimaux critiques de géométrie dépendent de la densité de la poudre à sec.**

Milieu homogène et milieu hétérogène

⇨ Comparaison entre l'oxyde d'uranium sous forme d'un milieu dit **(*)** :

- « Homogène » : mélange homogène d'oxyde d'uranium et d'eau (densité 10,96) ;
- « Hétérogène » : pastilles d'oxyde d'uranium (densité 10,96) non gainées, dans de l'eau à l'optimum du couple ($R_{pastille}$, R_{eau}), $R_{pastille}$ étant le rayon de l'oxyde et R_{eau} le rayon externe de la couronne d'eau.



Variation du diamètre minimal critique d'un milieu UO_2–H_2O homogène et hétérogène, en fonction de l'enrichissement en ^{235}U de l'uranium

À retenir :
Pour un milieu UO_2, le paramètre minimal critique de géométrie du milieu hétérogène est plus faible que celui du milieu homogène pour les faibles enrichissements.

Il en va de même pour les milieux mixtes $U_{nat}O_2$+PuO_2 : le milieu hétérogène est plus pénalisant pour les faibles teneurs en Pu.

(*) Note SEC/T/9000/94.149

On observe que le diamètre de cylindre minimal critique pour un milieu hétérogène est plus faible que pour un milieu homogène pour un enrichissement en isotope 235 de l'uranium est inférieur à 46 %. C'est aussi le cas pour l'épaisseur minimale critique de plaque (enrichissement < 34 %) et pour le volume minimal critique (enrichissement < 51%). Ces valeurs sont néanmoins à utiliser uniquement à titre indicatif, compte tenu de l'ancienneté des codes de calcul utilisés.

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.

Dispositions garantissant le respect du mode de contrôle de la criticité

⇨ Le mode de contrôle de la criticité par la géométrie impose peu de contraintes d'exploitation. En revanche, des dispositions de conception, de fabrication et de contrôle des appareils doivent être prises, ainsi que l'étude de toutes les situations anormales, notamment les agressions, pouvant remettre en cause le mode de contrôle :

- Maîtrise de la géométrie lors de la conception des équipements, par l'étude du fonctionnement normal et des situations anormales : corrosion, déformations mécaniques/thermiques/sous séisme, tolérances...
- Maîtrise de la géométrie dans les étapes de fabrication et contrôle des appareils ;
- Maîtrise des transferts, en exploitation, depuis des appareils de géométrie sûre vers des appareils de géométrie non sûre ;
- Maîtrise des modifications et opérations de maintenance des appareils, en exploitation.

⇨ Le mode de contrôle par la géométrie peut être associé à d'autres modes de contrôle : le plus fréquemment, il s'agit de la masse, de la concentration et/ou de l'empoisonnement hétérogène. Dans ce cas, il convient également de respecter les dispositions relatives à ces modes de contrôles.

Dispositions à prendre à la conception des équipements

⇨ *« Des dispositions seront prises pour prévenir les situations suivantes ou pallier leurs conséquences :*

- ***Déformation accidentelle des appareils** : prise en compte, à la conception, du risque de montée en pression ou de montée en température, et des causes extérieures de modification (séisme, déplacements de charges lourdes à proximité, incendie…) ;*

  Ces déformations potentielles sont à prendre en compte, le plus tôt possible lors de la conception de l'équipement, par l'intermédiaire d'une fiche de criticité (voir ci-après).

- ***Fuite ou débordement de solutions de matières fissiles hors des appareils** :*
  Réalisation de ceux-ci dans la classe de qualité appropriée, mise en place, au dessous d'eux, de lèchefrites capables de recueillir, dans des conditions sous-critiques, le plus grand volume de matière fissile susceptible de se répandre, et équipées de détecteurs de présence de liquide et de moyens de reprise ;

  La reprise de ces solutions ou leur transfert direct vers un autre équipement doivent être étudiés avec attention dans les analyses de sûreté-criticité. L'analyse doit démontrer qu'une fuite de solutions contenant de la matière fissile ou tout autre réactif ne remet pas en cause la sûreté sur le plan de la prévention du risque de criticité d'un autre équipement. Il convient notamment d'analyser :
  - Le mode de contrôle de l'équipement récepteur (géométrie sûre ou non) ;
  - Le milieu fissile de référence pris en considération, susceptible d'être remis en cause (ex : risque de précipitation du plutonium par la soude à étudier avec précaution si le milieu fissile de référence est le nitrate de plutonium).

- ***Envoi de solution de matière fissile dans les récipients de géométrie non sûre**, placés sur les circuits auxiliaires (évents, vide, réactifs, chauffage, refroidissement…) ;*

  Il est conseillé de contrôler périodiquement l'absence de matière fissile dans ces circuits auxiliaires ou de disposer des systèmes de détection (ex : pot de comptage gamma sur boucles de fluide caloporteur).

- ***Rapprochement de récipients mobiles contre les appareils** :*
  *Récipients mobiles de géométrie sûre, en nombre limité, entourés, si nécessaire, d'une structure rigide permettant de garantir un écartement suffisant avec les appareils fixes. » **(*)***

⇨ De plus, les analyses et les études de criticité doivent prendre en compte les différentes **réflexions** dues à l'environnement extérieur de l'équipement et les éventuelles **interactions neutroniques** avec les autres équipements contenant de la matière fissile (en particulier, les capacités mobiles).

☞ *Pour plus d'informations sur les réflecteurs et les interactions neutroniques : voir fiches n°15 et 16*

(*) Texte issu de la RFS I.3.c, pouvant être sujet à évolution après parution du futur guide de criticité de l'ASN.

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.

Dispositions de fabrication et de contrôle des équipements : fiche de criticité

⇨ Il est impératif d'avoir une description des équipements de géométrie sûre dans les dossiers de sûreté afin de s'assurer que les hypothèses de géométrie prises en compte dans les calcul de criticité sont enveloppes.

⇨ Il est conseillé, en particulier, pour ce qui concerne les nouveaux équipements et autant que faire se peut pour les anciens, d'avoir recours au concept de **fiche de criticité** présentant :

- Les dimensions géométriques de l'équipement tel que construit (TQC) : cotes nominales, tolérances, surépaisseurs de corrosion…
- Une comparaison de ces cotes aux hypothèses de calcul, en vue d'en justifier le caractère enveloppe ;
- Les matériaux constituant l'équipement ;
- Le milieu fissile de référence ;
- Les distances avec les autres équipements contenant de la matière fissile (interactions neutroniques) ;
- Les distances avec l'environnement extérieur (murs, équipements susceptibles de modifier la réflexion neutronique) ;
- La composition des éventuels poisons neutroniques présents dans les structures des équipements.

Dispositions à prendre en exploitation — maîtrise des transferts

⇨ « *Il peut être nécessaire d'établir des circuits permettant le transfert de solutions entre des appareils de géométrie sûre et d'autres de géométrie non sûre. Deux cas peuvent se présenter :*

- ***Les appareils de géométrie non sûre sont destinés, en fonctionnement normal, à la réception de solutions ne présentant pas de risque de criticité en milieu infini*** *: si les dispositifs de contrôle de bon fonctionnement du procédé, sont tels que le principe* [de double défaillance] *est satisfait et, qu'en conséquence, le risque d'arrivée intempestive de solutions présentant un risque de criticité en milieu infini dans l'appareil de géométrie non sûre est négligeable, le circuit de transfert peut-être permanent et direct. Dans le cas contraire, le circuit de transfert est fermé et le transfert de solutions ne peut-être fait qu'après vérification, par deux estimations, par des méthodes différentes, que la concentration en matière fissile de la solution contenue dans l'appareil de géométrie sûre, est satisfaisante ;*
- ***Les appareils de géométrie non sûre sont destinés à recevoir les solutions provenant d'opérations à caractère exceptionnel*** *(solutions de décontamination par exemple) : le circuit de transfert doit être interrompu en fonctionnement normal par des dispositifs appropriés et fiables. L'établissement de la liaison et le transfert se feront selon une procédure écrite prévoyant notamment deux estimations, par des méthodes différentes, de la concentration ou la masse de matière fissile dans la solution contenue dans l'appareil de géométrie sûre. » **(*)***

Nota : Pour ce qui concerne les installations en cours de Cessation Définitive d'Exploitation (CDE) ou de Mise à l'Arrêt Définitive (MAD), une analyse spécifique doit être réalisée, les solutions de décontamination étant à caractère non exceptionnel lors de ces opérations.

Dispositions à prendre en exploitation — modification et maintenance des équipements

⇨ « *Toute modification susceptible de remettre en cause l'analyse du risque de criticité : modification d'appareillage, de son implantation, de son environnement (protections biologiques par exemple), de conditions opératoires…, sera effectuée suivant une procédure écrite prévoyant, en particulier, la consultation préalable de spécialistes en sûreté-criticité.* » ***(*)***

⇨ Une attention particulière devra être portée à toute modification susceptible de modifier l'analyse du risque de criticité. En particulier, les fiches de criticité devront être mises à jour après toute modification d'équipement.

Nota : Des capacités ne doivent pas être introduites dans une unité en contrôle par la géométrie si elles ne sont pas nécessaires pour les opérations d'exploitation courante (ex : boîte à gants) ; sinon, elles doivent être également de géométrie sûre (carters, balance…) ou être percées de trous (boîte à outils percée…) pour y éviter une accumulation fortuite de matière.

(*) Texte issu de la RFS I.3.c, pouvant être sujet à évolution après parution du futur guide de criticité de l'ASN.

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.