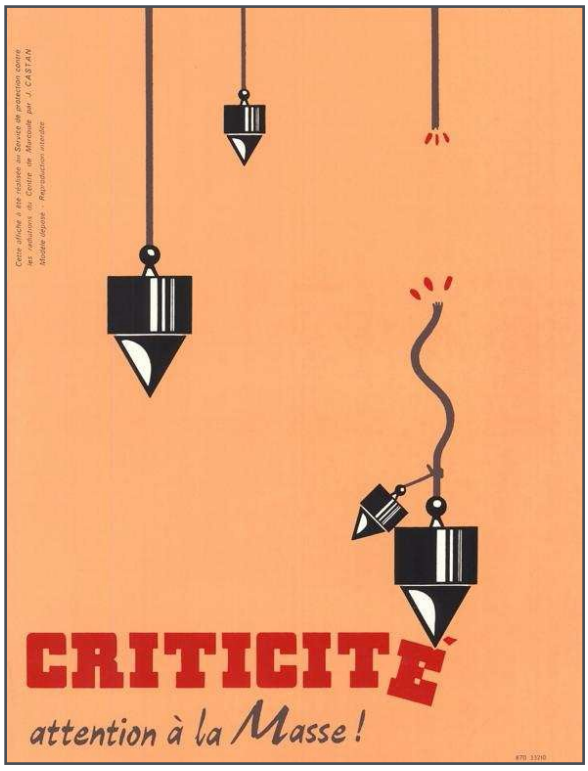
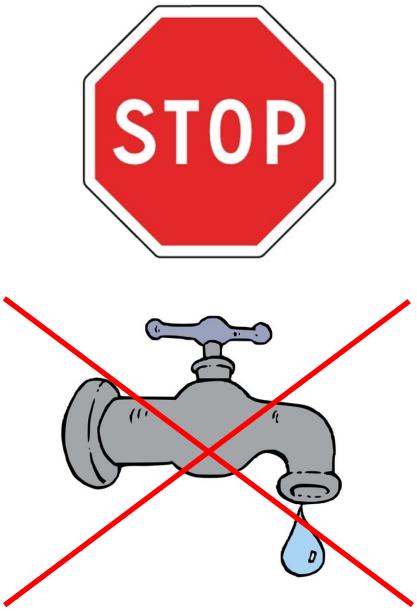
FICHE N°12

MODE DE CONTRÔLE DE LA CRITICITÉ PAR LA MASSE ET LA MODÉRATION





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 limitation de la modération associée à la limitation de la masse de matières fissiles** est réservé aux **produits secs ou peu humides, peu hygroscopiques, et ne risquant pas de le devenir au cours du procédé.**

⇨ Il permet la manipulation de **masses de matières fissiles importantes**. Il est adapté, en particulier, aux **ateliers de fabrication d'éléments combustibles, aux ateliers de métallurgie ou aux laboratoires d'analyses physiques** (oxydes pulvérulents, pastilles frittées, crayons ou aiguilles combustibles, assemblages combustibles).

⇨ Le respect des limites de masse et de modération repose sur la prise en compte de **dispositions constructives** (conception des équipements, prévention des risques d'inondation…) et de **dispositions en exploitation** (comptabilité/transfert des matières fissiles et modératrices…).

Rappels et définitions

⇨ **Modération** : la modération est le processus de ralentissement par diffusion, sans capture, des neutrons lors de collisions successives avec les noyaux du modérateur (voir fiche n°1). Plus les noyaux sont légers (ex : hydrogène de l'eau ou des matières plastiques), plus la modération est efficace. La plupart des noyaux fissiles a une section efficace de fission d'autant plus importante que l'énergie des neutrons incidents est faible : les réactions de fissions sont donc favorisées par tout processus pouvant ralentir (modérer) les neutrons.

⇨ **Matière modératrice** : « matière constituée d'éléments chimiques modérateurs » **(*)**, i.e. qui réduisent l'énergie des neutrons par diffusion, **avec une faible capture**. Ces matières contiennent des éléments légers avec des sections efficaces d'absorption faibles et des sections efficaces de diffusion importantes. Les principaux noyaux modérateurs sont l'hydrogène, le deutérium, le carbone…

⇨ **Matière hydrogénée** : le plus souvent, les matériaux modérateurs rencontrés dans une installation sont des matériaux contenant de l'hydrogène (eau, huiles, plastiques, papiers, produits de décontamination, poudres extinctrices…) ; ces matières sont des sources potentielles de modération.

⇨ **Paramètres de modération** :

- **Rapport de modération** :
  - Milieu homogène : rapport atomique **H/X, C/X**…, où X = U, Pu, U+Pu, ^{235}U, ^{235}U+Pu...
  - Milieu hétérogène : $\mathbf{V_{mod}/V_{fiss}}$ (rapport du volume occupé par la matière modératrice au volume occupé par le milieu fissile) ;
- **Volume d'eau** ou de matériau modérateur ;
- **Masse d'eau** ou de matériau modérateur ;
- **Humidité des poudres** :
  - **Humidité (h)** d'une poudre, s'exprimant par : $h(\%) = \dfrac{masse_{eau}}{(masse_{eau} + masse_{oxyde})}$
  - **À DISTINGUER DE** :
  - **Reprise d'humidité d'une poudre (h*)**, s'exprimant par : $h^*(\%) = \dfrac{masse_{eau}}{masse_{oxyde\,\mathrm{sec}}}$

⇨ Il existe deux types de modération :

- La **modération homogène** qui correspond à une répartition de la matière modératrice de manière homogène avec la matière fissile. Elle est applicable :
  - Dans le cas de la modération due à la reprise d'humidité pour les poudres,
  - Lorsque que l'homogénéité du modérateur dans la matière fissile est garantie : après homogénéisation des poudres et des additifs dans l'homogénéiseur de MELOX, par exemple ;
- La **modération hétérogène** qui correspond à une répartition de la matière modératrice sur une fraction quelconque (variable) de la matière fissile. Elle est applicable :
  - Quand aucune garantie ne peut être apportée sur la répartition du modérateur.

(*) Définition issue de la « décision criticité » n° 2014-DC-0462

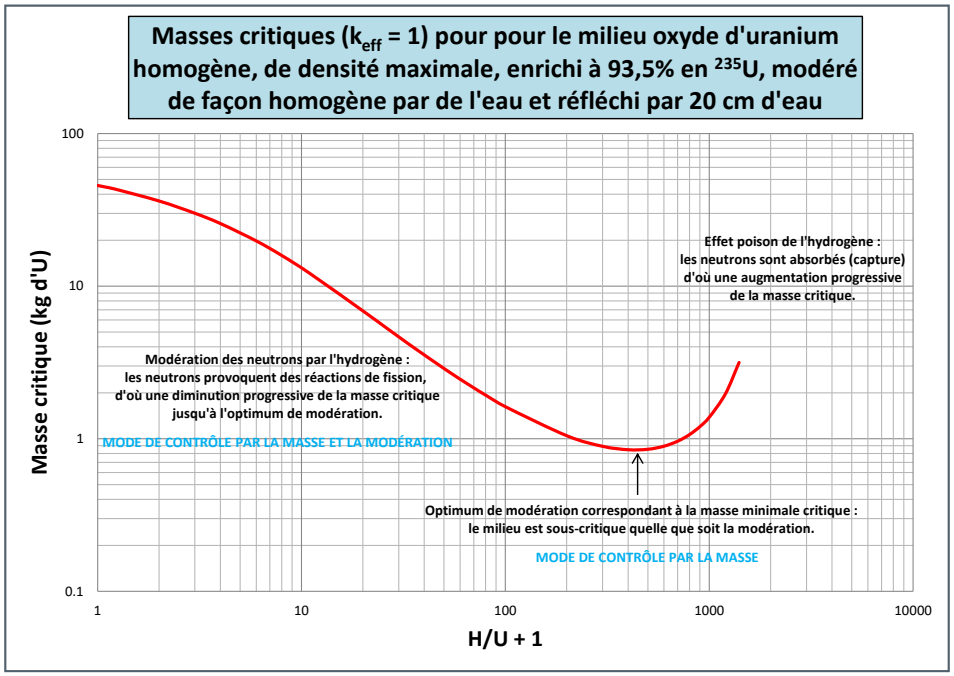
Ce document, élaboré pour la réalisation d'études de sûreté-criticité, est la propriété du CEA. Il ne se substitue en aucun cas à une analyse de sûreté-criticité ou à l'avis d'un ingénieur criticien et ne peut pas servir de référence directe.

Paramètres

⇨ Ce mode de contrôle de la criticité consiste à limiter, par unité de criticité, deux paramètres :

- La **masse de matières fissiles** ;
- La **quantité de matières modératrices**.

⇨ Ces limites sont fixées pour un **milieu fissile de référence** (voir fiche n°4) et doivent tenir compte des **réflecteurs** et des **interactions** éventuelles.



Détermination des limites

⇨ Répartition de la matière modératrice : Pour certains milieux, la modération hétérogène est équivalente à la modération homogène (ex : Pu métal pur en isotope 239). Pour d'autres milieux, la modération hétérogène est plus pénalisante vis-à-vis du risque de criticité que la modération homogène.

⇨ Pour les milieux « poudres », la variation de la masse critique en fonction de la modération **dépend de la densité du produit sec** pour la plage de modération correspondant au « palier poudre » (voir fiche n°5 et ci-après).

Modération homogène

⇨ Déterminer, en tenant compte des matériaux réflecteurs présents dans l'environnement proche de la matière fissile, les valeurs critiques de masse et du paramètre de modération pris en considération, à partir de la courbe de variation de la masse en fonction du paramètre de la modération déterminée pour k_{eff} = 1.

⇨ La **démarche idéale recommandée** est la suivante :

- Tracer la courbe m = *f* (paramètre de modération) pour un k_{eff} = 1 et pour des valeurs de k_{eff} plus faibles : on obtient ainsi les **valeurs critiques** et les **valeurs admissibles** ;
- Définir les besoins en exploitation des quantités de matières fissiles et de matières modératrices ;
- Déterminer la marge par rapport à la courbe admissible en faisant un point supplémentaire de calcul avec les quantités de matière fissile et de modération nécessaires pour les besoins de l'exploitation.

Attention : Selon les paramètres de modération pris en compte et le milieu fissile de référence, les courbes de variation m = *f* (modération) peuvent présenter un/des point(s) de rebroussement.

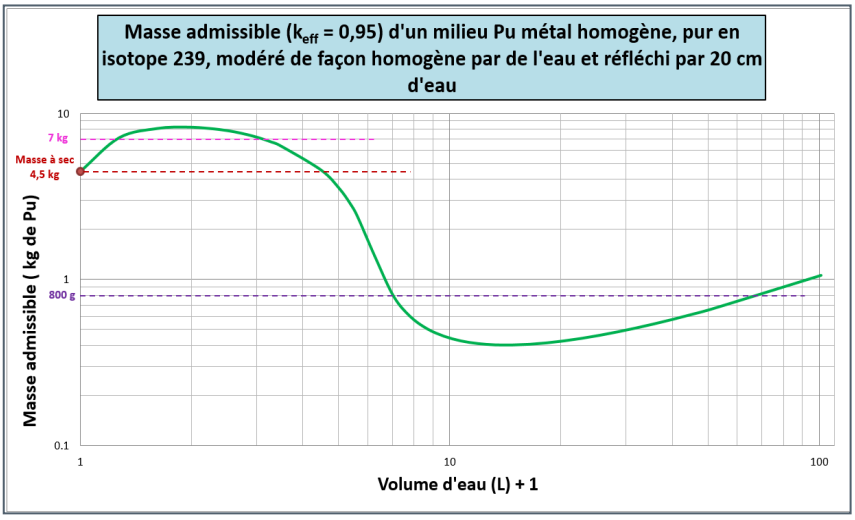
Nota : La méthode consistant à prendre des coefficients de sécurité sur les quantités de matières fissiles et de modérateur n'est pas rigoureuse, puisqu'elle ne permet pas de quantifier les marges, le comportement des milieux fissiles en fonction de la modération étant difficilement extrapolable.

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.

Exemple 1 : détermination du couple masse-volume d'eau admissibles pour du Pu métal

⇨ La courbe montre que, pour le plutonium métal pur en isotope 239, en considérant un critère d'admissibilité à k_{eff} = 0,95 :

- Une masse de 800 g de Pu est admissible pour un volume d'eau compris entre 6 L et 65 L environ. **Les valeurs limites à prendre en considération sont 800 g de Pu et 6 L** ;
- Une masse de 7 kg de Pu est admissible pour un volume d'eau compris entre 0,2 L et 2 L environ. Toutefois, comme pour des masses inférieures à 7 kg, il existe des volumes d'eau inférieurs à 0,2 L non admissibles, la justification de sûreté-criticité ne peut pas se faire pour cette masse : **il s'agit d'un domaine interdit** ;
- La justification de la sous-criticité ne peut pas se faire sur la base d'une masse critique de Pu supérieure à 4,5 kg. La limite critique de Pu de **4,5 kg** est valable **en absence de toute modération (produit sec) ou avec une modération limitée (< 3,5 L)**.



Exemple 2 : détermination du couple masse-volume d'eau admissibles pour de l'oxyde d'U

La masse et la valeur du paramètre de modération admissibles pris en considération peuvent être déterminées en traçant la courbe de variation m = *f* (paramètre de modération) pour un k_{eff} donné, inférieur à 1 (par exemple k_{eff} = 0,95).

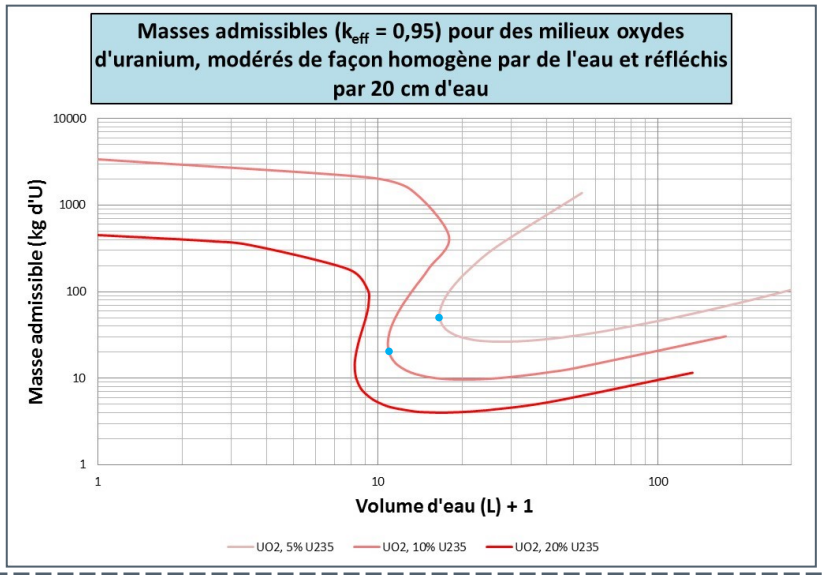
⇨ Les courbes ci-après montrent que, pour de l'oxyde d'uranium homogène de densité maximale :

- Pour un enrichissement de 5 %, le k_{eff} est inférieur à 0,95, quelle que soit la masse d'U, si le volume d'eau est inférieur à 15 L environ ;
- Pour cet enrichissement, le mode de contrôle de la criticité est un mode de contrôle par la **limitation du volume d'eau** uniquement.

⇨ Pour des enrichissements supérieurs (10%, 20%...), l'allure des courbes montre qu'il faut fixer 2 paramètres (m_U et V_{eau}) pour avoir un k_{eff} de 0,95.

- Par exemple, pour un enrichissement de 10 %, un mode de contrôle de la criticité possible est la **limitation de la masse (20 kg d'U) associée à une limitation du volume d'eau (~ 10 L)**.

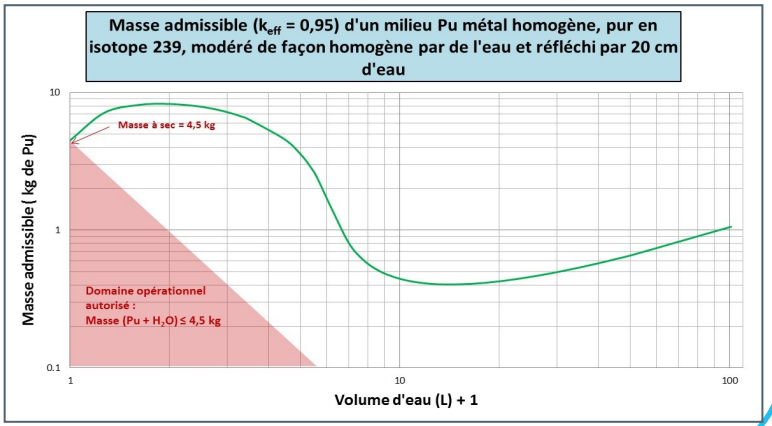
⇨ De même que précédemment, il faut veiller à ne pas placer les limites de fonctionnement dans un domaine interdit.



Exemple 3 : détermination d'une masse totale {fissile + modérateur} admissible pour du Pu métal

⇨ Dans certains cas, la quantité de matières modératrices n'est pas facilement accessible. En ce cas, on peut gérer la sûreté-criticité sur la base d'un seul paramètre qui est la **masse totale du milieu fissile de référence (fissile + modérateur)** comme indiqué sur la courbe ci-contre.

⇨ Ici, si la masse du milieu fissile de référence (masse de Pu + masse d'eau) est inférieure à 4,5 kg (zone en rouge), la sûreté-criticité est assurée.



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.

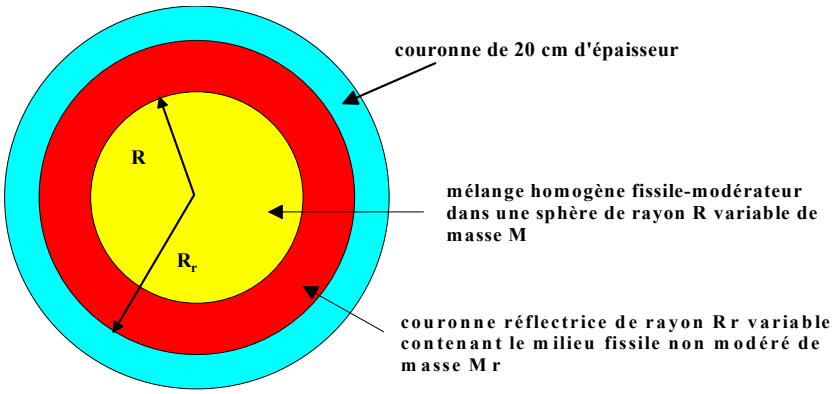
Modération hétérogène

⇨ Des calculs complémentaires sont souvent nécessaires pour étudier le cas de la **répartition hétérogène de la modération** dans la matière fissile. Cette configuration peut être, en effet, beaucoup plus pénalisante que celle où le modérateur est réparti de manière homogène dans la matière fissile.

⇨ La configuration « **modération hétérogène** » consiste à déterminer le k_{eff} :

- D'une sphère de rayon R, variable, contenant le mélange homogène fissile-modérateur ;
- Entourée d'une coquille réflectrice de rayon R_r, variable, constituée du milieu fissile non-modéré (ou à la modération initiale lorsqu'il s'agit de produits ayant une reprise d'humidité) ;
- Entourée d'une couronne de réflecteur (20 cm d'eau par exemple).

⇨ La masse totale de matière fissile, M_t, répartie entre la sphère de rayon R et la coquille réflectrice de rayon R_r, est constante, afin d'obtenir la configuration la plus pénalisante vis-à-vis du risque de criticité.



$M_t = M + M_r$ = constante

⇨ Une telle étude permet de calculer le volume ou la masse de modérateur qu'il est possible de mettre en contact avec une masse connue de matière fissile. Cela permet de déterminer par exemple les quantités maximales de modérateurs qui peuvent être introduites dans une boîte à gants et qui seront susceptibles d'être mélangées avec la matière fissile, soit en fonctionnement normal, soit lors de situations anormales.

Exemple : milieu fissile UO_2 (10 % ^{235}U) de densité 10,95

Configuration homogène ($R_r = 0$) : une masse de 12 kg d'^{235}U, mélangée de manière homogène à 6,5 L d'eau, a un **$k_{eff} < 0,95$**.

Configuration hétérogène : une masse M = 0,95 kg d'^{235}U, mélangée de manière homogène à 6,5 L d'eau (R = 12,1 cm) et entourée d'une masse M_r = 11,05 kg d'^{235}U (R_r = 16,5 cm), soit une masse totale M_t = 12 kg d'^{235}U a un **k_{eff} de 1,0005**.

=> **Le couple {12 kg d'^{235}U ; 6,5 L d'eau} est inacceptable du point de vue du risque de criticité dans l'hypothèse d'une configuration correspondant à une modération hétérogène**.

⇨ Situations relevant d'une configuration hétérogène :

- Mélange de porogène et de lubrifiants dans la poudre d'UO_2 lors de la fabrication du combustible ;
- Introduction accidentelle d'un produit hydrogéné (fuite d'un vérin hydraulique, d'huile d'un moteur...) dans un récipient contenant de la poudre d'UO_2 ;
- Mélange de poudre de matière fissile avec une poudre extinctrice susceptible d'être modératrice.

Exemple : Lors des opérations de fabrication de pastilles d'UO_2, une phase du procédé consiste à mélanger la poudre d'UO_2 avec du porogène et des lubrifiants (produits modérateurs) dans un homogénéiseur. La poudre est préalablement introduite dans l'homogénéiseur. Le porogène et les lubrifiants sont rajoutés, alors que le bras mécanique de l'équipement fonctionne. Avant d'obtenir une poudre parfaitement homogène, la répartition des produits modérateurs dans la poudre peut être localisée, au début des opérations, dans la partie centrale de l'équipement (poudre modérée), le reste de la poudre non modérée jouant un rôle de réflecteur.

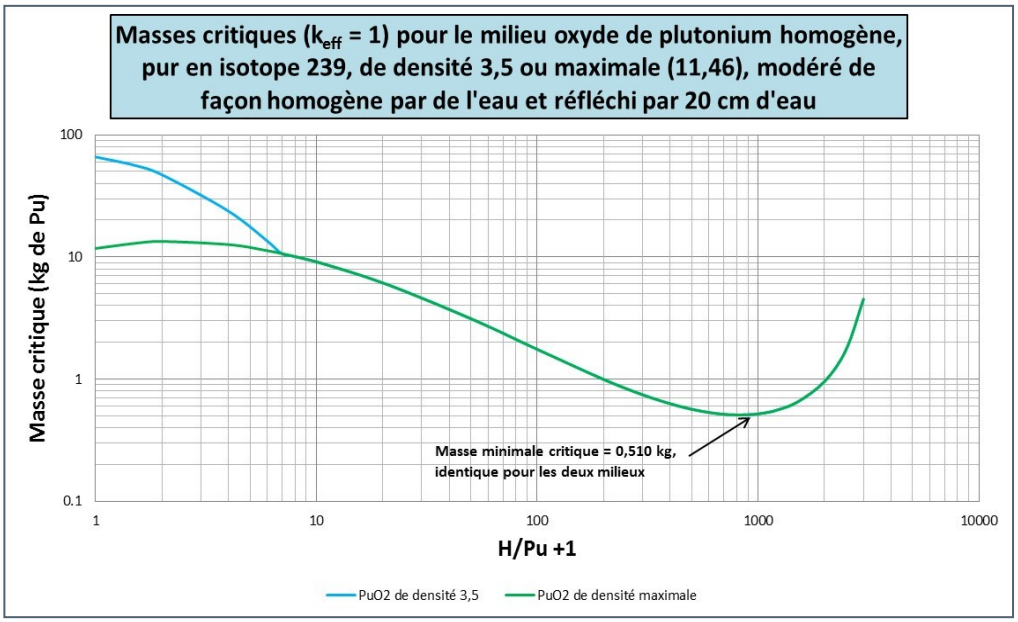
Ce document, élaboré pour la réalisation d'études de sûreté-criticité, est la propriété du CEA. Il ne se substitue en aucun cas à une analyse de sûreté-criticité ou à l'avis d'un ingénieur criticien et ne peut pas servir de référence directe.

Cas des milieux « poudres »

⇨ Pour les milieux « poudre », la variation de la masse critique en fonction de la modération **dépend de la densité du produit sec** pour les valeurs du rapport de modération correspondant au « palier » dû au remplissage complet par l'eau du volume de vide contenu dans la poudre (voir fiche n°5).

⇨ Au-delà du palier, le comportement des milieux poudres et du milieu cristal est identique, l'effet de densité ne jouant plus.

⇨ La courbe montre, pour ce qui concerne le milieu « oxyde de plutonium » que, pour les faibles valeurs de H/Pu, les masses critiques d'un milieu « poudre » sont plus élevées que celles correspondant au milieu « cristal ».



À retenir :
Pour les milieux « poudres », à sec ou à faible modération, la masse critique dépend de la densité de la poudre.

Dispositions garantissant le respect du mode de contrôle de la criticité

⇨ Ce mode de contrôle entraine des contraintes qui doivent être prises lors de la conception et de la fabrication des équipements (dispositions constructives) et des contraintes qui doivent être prises au cours de l'exploitation :

- Étude, lors de la **conception des équipements**, des dispositions qui visent à écarter tout risque de modération d'origine externe à l'installation ou interne par **interposition de barrières entre la matière fissile et les matières modératrices**, en fonctionnement normal ou anormal ;
- Maîtrise, au cours de l'**exploitation**, de la **comptabilité des matières fissiles** (cf. fiche n°7) et de la **comptabilité des matières modératrices**.

Dispositions constructives

⇨ Les dispositions constructives à prendre en compte concernent essentiellement le contrôle de la modération dans l'unité de criticité concernée : celles-ci sont détaillées ci-après. Les dispositions applicables au contrôle de la masse (délimitation de l'UC, conception des équipements vis-à-vis des risques d'accumulation de matière… voir fiche n°7) sont également applicables.

⇨ « *Deux barrières dont l'intégrité sera surveillée, seront interposées entre la matière fissile et les fluides hydrogénés. Dans certains cas, une seule barrière pourra être tolérée si des dispositions particulières sont prises, notamment en ce qui concerne sa qualité. Les risques de modération accidentelle d'origine externe (crues, tornades, chutes de neige, intervention en cas d'incendie…) et d'origine interne (fuites de canalisations, projection d'huile…) seront pris en compte.* » ***(*)***

(*) 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 RELATIVES AUX RISQUES D'INONDATION D'ORIGINE EXTERNE

⇨ **Bâtiment**

- Construit en zone non inondable ; à défaut, les locaux contenant les appareils concernés par le mode de contrôle doivent être suffisamment surélevés pour écarter tout risque de criticité en cas de crue (seuil de porte, surbau…) ; à défaut, les appareils eux-mêmes doivent être suffisamment surélevés ,
- Résistant pour éviter toute rupture d'étanchéité en cas d'intempéries (tornade, neige…) ou lorsqu'il s'agit d'un bâtiment enterré (réseau de drainage avec pompes de relevage...).

DISPOSITIONS RELATIVES AUX RISQUES D'INONDATION/D'ASPERSION D'ORIGINE INTERNE

⇨ **Cellules**

- Éviter les **traversées de canalisations** dans les locaux, sinon :
  - ♦ Placer les canalisations dans des caniveaux/carneaux étanches plutôt qu'aux murs et plafond ; prévoir des détecteurs d'inondation ou de fuite avec procédures d'intervention,
  - ♦ Placer des doubles enveloppes ou des lèchefrites sous les canalisations (sans pression si possible ; les tuyauteries sous pression devant être évitées autant que faire se peut) avec une surveillance adaptée ;
- L'analyse doit démontrer que la présence de ces canalisations est acceptable vis-à-vis du risque de criticité.

⇨ **Boîte à gants**

- Étanche à la projection ou l'aspersion d'eau ;
- Atmosphère sèche (ex : ventilation par air sur-séché ou azote) ;
- Liaison avec boîte à gants comportant des fluides par l'intermédiaire d'un sas étanche à double opercule (ouverture simultanée interdite). La boîte à gants « humide » doit être munie d'un détecteur d'inondation et d'un drainage vers des cuves d'effluents.

⇨ **Appareils**

- **Chauffage et refroidissement** : privilégier les moyens ne faisant pas intervenir de modérateur (chauffage électrique/par induction, refroidissement à l'air en convection naturelle/forcée…), sinon :
  - ♦ Fluide caloporteur sous double enveloppe avec surveillance (contrôle des pressions),
  - ♦ Serpentins brasés à l'extérieur de l'appareil et hors boîte à gants,
  - ♦ Empoisonnement éventuel des fluides (NB : stabilité du poison dans le temps à démontrer),
  - ♦ Carters d'huile sous les appareils et si possible hors boîte à gants,
  - ♦ Utilisation d'huiles faiblement hydrogénées (si possible),
  - ♦ ...

⇨ **Matière fissile**

- Maîtrise de l'humidité des poudres à l'entrée de l'installation par le procédé ;
- Limitation et comptabilité des quantités d'additifs modérateurs.

⇨ **Intervention en cas d'incendie**

- Utilisation d'eau en cas d'incendie à proscrire ;
- Utilisation de poudres extinctrices non hydrogénées ou faiblement hydrogénées (MARCALINA, MG20…).



A retenir : Faire une analyse aussi exhaustive que possible de toutes les possibilités d'introduction d'eau d'origine externe et interne, et prévoir des dispositions de prévention/surveillance adéquates à leur égard.

Nota : La présence de matières modératrices dans l'environnement de l'unité de travail doit également être étudiée vis-à-vis des **conditions de réflexion**. Par exemple, une réflexion nominale par 2,5 cm d'eau ne pourra pas être considérée si une tuyauterie d'eau de diamètre élevé circule à proximité des équipements concernés.

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 à prendre en exploitation

⇨ Les dispositions à prendre en exploitation ont pour objectifs de garantir que :

- La **masse de matière fissile** présente à tout moment dans l'unité de criticité reste **inférieure à la masse maximale autorisée** → pour cela, considérer les dispositions d'exploitation présentées dans la fiche n°7 ;
- Les **quantités de matières modératrices**, qu'elles soient **réparties de façon homogène ou hétérogène** (voir ci-avant), sont **inférieures aux limites autorisées**.

⇨ **Identifier visiblement les zones** faisant intervenir un mode de contrôle de la criticité par la limitation de la modération.

⇨ **Indiquer** clairement **les limites et consignes nécessaires** pour le contrôle de la modération.

⇨ Préciser quels sont les **matières modératrices autorisées** à être mises en œuvre dans l'unité et susceptibles de se mélanger à la matière fissile.

⇨ Utiliser des **paramètres de modération exploitables** dans une unité de travail ; en particulier, sont à proscrire :

- Le rapport de modération (H/X, V_{mod}/V_{fiss}) ;
- L'humidité.

⇨ **Les traduire**, dans les consignes d'exploitation, **en grandeurs concrètes et compréhensibles** :

- Volume de modérateur : volume d'eau, d'huile, de décontaminant...
- Masse de modérateur : masse d'eau, de matières plastiques, d'additifs dans la fabrication des pastilles...
- Nombre d'échantillons, de conteneurs…

⇨ Dans les analyses de sûreté relatives à la prévention du risque de criticité, ne pas oublier de porter une attention particulière aux circuits auxiliaires (circuit de refroidissement, de chauffage, hydraulique…), aux pompes, aux vérins hydrauliques, aux circuits d'huile de moteur… susceptibles, en cas d'anomalie, de conduire à la présence de produits hydrogénés dans une unité ayant une limite de modération (parfois ces équipements ne se trouvent pas dans l'unité mais peuvent y être raccordés par l'intermédiaire d'autres circuits).

> **Exemple** : Dans une installation, la présence d'eau a été observée au niveau d'un vérin pneumatique situé dans une boîte à gants dont le mode de contrôle de la criticité repose sur une limitation de la modération. Cette eau provenait du circuit de chauffage de l'installation qui, en raison de la baisse de pression consécutive à l'isolement d'un circuit d'air comprimé, est remontée dans ce dernier par l'intermédiaire d'un ballon tampon.

GESTION DES MASSES DE MATIÈRES FISSILES DANS L'UNITÉ DE CRITICITÉ

⇨ **Voir fiche n°7.**

GESTION DES QUANTITÉS DE MATIÈRES MODÉRATRICES DANS L'UNITÉ DE CRITICITÉ

⇨ La gestion des quantités de matières modératrices dans l'unité de travail a pour objectif de maitriser les quantités de matériaux modérateurs répartis de façon homogène ou hétérogène dans la matière fissile.

⇨ **Les limites opérationnelles de quantités de matières modératrices doivent prendre en compte le fonctionnement normal et les situations anormales.**

⇨ Pour une boite à gants, en fonctionnement normal, il convient d'identifier les matières hydrogénées mises en contact avec la matière fissile :

- **Modération homogène** : humidité et additifs pour les poudres ;
- **Modération hétérogène** : matières plastiques (emballages, pots…) , araldite, plexiglas… (par exemple).

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.

Modération homogène de la matière fissile

⇨ Pour une poudre, la modération homogène est généralement apportée par :

- La **reprise d'humidité** des poudres
- Les **quantités d'additifs hydrogénés** mélangés à la matière fissile et utilisés lors de la fabrication de pastilles d'oxyde (porogène, lubrifiants…). Ce sont également des produits ayant un pouvoir de modération important, qu'il faut prendre en compte lors du calcul de volume de modérateur
  - ♦ Leur teneur doit être convertie en « équivalent eau »,
  - ♦ Leur quantité est exprimée soit en pourcentage de la masse d'oxyde, comme la reprise d'humidité (h*) des poudres, soit en masse.

Nota : valeurs usuelles de modération homogène des poudres dans les opérations de fabrication de combustible

1. Reprise d'humidité des poudres

- Les teneurs en eau maximales mesurées des poudres d'oxydes UO_2 et PuO_2 sont respectivement de 0,3 % et 0,5 % (en proportion massique) : dans les études de criticité, la valeur de la teneur en eau des oxydes retenue communément **dans des enceintes ventilées en azote sec** est de **1 %** ;
- Les valeurs bibliographiques des reprises maximales d'humidité dans les poudres sont de 2,5 % pour l'UO_2 et le PuO_2 : dans les études de criticité, la reprise d'humidité retenue communément **hors atmosphère contrôlée**, est de **3 %**.

2. Additifs hydrogénés

- La quantité d'additifs utilisés pour les opérations de dosage du mélange primaire, de chamottage, d'homogénéisation, de pastillage est généralement limitée à 1,4 % de la masse d'oxyde, soit une humidité h* = **2 % en équivalent eau, en fonctionnement normal** ;
- **En situation anormale**, c'est-à-dire en cas de double chargement d'additifs, l'humidité de la poudre est de **4 % en équivalent eau**.

3. Bilan

En conclusion, les valeurs usuelles de modération homogène des poudres UO_2 et PuO_2 retenues pour les études de sûreté dans les installations de fabrication de combustible sont :

- En fonctionnement normal, l'humidité de la poudre est généralement : $h^* = 1\ \%_{\text{reprise d'humidité}} + 2\ \%_{\text{additifs}} = 3\ \%$;
- Deux situations anormales peuvent être envisagées :
  - ♦ Double chargement d'additif avec reprise d'humidité normale : $h^* = 1\ \%_{\text{reprise d'humidité}} + 2 \times 2\ \%_{\text{additifs}} = 5\ \%$,
  - ♦ Reprise maximale d'humidité avec chargement normal d'additifs : $h^* = 3\ \%_{\text{reprise d'humidité}} + 2\ \%_{\text{additifs}} = 5\ \%$.

$h^*_{normal} = 3\ \%$ $h^*_{anormal} = 5\ \%$

⇨ Les dispositions à prendre pour la maitrise de l'humidité des poudres sont principalement :

- Le **contrôle des matières réceptionnées** :
  - ♦ Informations fournies par l'expéditeur,
  - ♦ Bordereau de livraison,
  - ♦ Intégrité de l'emballage ;
- Imposer aux **fournisseurs** une teneur maximale des poudres en produits hydrogénés ;
- Pour les entreposages, pas de reprise d'humidité car le conditionnement des poudres se fait :
  - ♦ En étui soudé pour l'oxyde de plutonium,
  - ♦ Sous double enveloppe plastique pour l'oxyde d'uranium ;
- Pour les postes de travail, pas de reprise d'humidité additionnelle si les enceintes de confinement sont sous **atmosphère d'azote sec** ;
- Situations anormales à étudier :
  - ♦ Défaut de fabrication ou du suivi fournisseur,
  - ♦ Reprise d'humidité lors des opérations d'entreposage et de transport (défaut d'étanchéité),
  - ♦ Perte de la ventilation sous azote dans les enceintes de confinement,
  - ♦ ...

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.

Nota : utilisation des équivalences « eau-modérateur »

- Matériau moins modérateur que l'eau : calculer précisément l'équivalence ou assimiler ce matériau à de l'eau :
  - Ex : 1 L d'huile = 1 L d'eau,
  - Ex : 1 g d'araldite = 1 g d'eau ;
- Matériau plus modérateur que l'eau : faire impérativement le calcul d'équivalence :
  - Ex : le vinyle (CH_2) : M_{CH2} = 7/9 M_{H2O} : à convertir en nombre de sacs vinyles.
    Cette règle dite « des $7/9^e$ », utilisée pour certaines installations, peut être appliquée sous réserve de l'existence de marges suffisantes.

Attention : la comparaison des pouvoirs modérateurs des matériaux est fonction du domaine dans lequel ils sont utilisés.

Modération hétérogène de la matière fissile

⇨ La masse de modérateur mobilisable doit être **connue** à tout moment dans l'unité de criticité et doit rester **inférieure à la limite admissible**.

⇨ Des procédures de gestion des masses de matières modératrices doivent être mise en place, notamment :

- **Répertorier les entrées et sorties** de matières modératrices pour permettre d'établir leur **bilan continu** dans l'unité de criticité ;
- **Interdire l'entrée** de matière modératrice si la quantité maximale peut être dépassée ;
- **Procéder à des vérifications périodiques des quantités** de matières modératrices présentes dans l'unité de criticité pour vérifier la validité les bilans entrées/sorties.

⇨ Certains matériaux peuvent éventuellement être considérés **hors contact avec la matière fissile en fonctionnement normal** (matières non mobilisables) dans la mesure où ils ne sont jamais mélangés avec la matière fissile. Dans ce cas, ces matériaux **ne sont pas à comptabiliser**. Il s'agit notamment :

- Des bootings de télémanipulateurs ;
- Des poudres extinctrices ;
- Des matériaux contenus dans des boîtes, récipients, fûts… fermés ;
- Des gants ;
- Du petit matériel localisé (avec consignes) ;
- Des câbles électriques ;
- D'outils (certains ayant des manches en plastique) ;
- Et de façon générale, des matières localisées et non présentes sur le plancher de la boîte à gants, de la cellule, du plan de travail.

Attention néanmoins à étudier leur prise en compte potentielle en cas de **situation anormale** (chute du matériau, incendie impliquant la mise en œuvre de poudre extinctrice, séisme…) : voir fiches n°17 à 20.

Interactions neutroniques

⇨ Les notes CSIA 66-216 et 68-304 (et leur version reformulée) précisent qu'il est permis de juxtaposer, sur une seule couche, un nombre quelconque d'unités de travail, dont les limites sont définies dans la note, à condition de :

- Matérialiser le contour de chaque unité (murs, parois, bandes de peintures) ;
- Maintenir une distance minimum bord à bord de **60 cm** entre les unités voisines dans le cas où le risque de double chargement est exclu ;
- Maintenir une distance minimum bord à bord de **30 cm** entre les unités voisines dans le cas où le risque de double chargement ne peut pas être exclu ;
- Respecter des limites de masse et/ou de modération par unité.

Pour plus d'informations à ce propos, se reporter à la 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.

Sources potentielles de modération

⇨ D'une manière générale, tous les matériaux contenant une chaîne hydrogénée peuvent être source potentielle de modération.

⇨ Les principales matières modératrices que l'on peut retrouver dans une installation sont présentés ci-dessous (*liste non exhaustive*) :

⇨ **Tuyauteries :**
- Tuyauteries d'eau et de vapeur

⇨ **Équipements :**
- Lubrifiants
- Conteneurs, enveloppes en plastique, piluliers
- Systèmes hydrauliques
- Systèmes de refroidissement
- Boîtes à gants et hottes (matériaux)

⇨ **Instrumentation du procédé :**
- Systèmes de chauffage et de refroidissement
- Gaines de ventilation
- Câbles électriques

⇨ **Matériaux de construction**

⇨ **Maintenance et modification d'activités**

⇨ **Décontamination :**
- Produits nettoyants
- Mouchoirs en papier
- Éponges
- Coton

⇨ **Environnement :**
- Humidité de l'air

⇨ **Procédés chimiques et additifs :**
- Liants et porogènes
- Solvants
- Surplus de modérateurs liés au procédé

⇨ **Moyens d'extinction incendie**

⇨ **Interventions humaines :**
- Introduction de matériaux modérateurs non autorisés
- Nettoyage à l'eau
- Présence de personnel
- Alcool
- Ammoniaque
- Deutérium
- Matériaux biologiques
- Graphite (carbone)
- Béton (présence d'eau lors des travaux)
- Poudres extinctrices
- Liants et porogènes
- Gants
- Huiles
- Paraffine
- Vinyles
- Polyéthylène (matières plastiques d'une manière générale)
- Résines
- Eau
- Résines araldite
- Peinture

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.