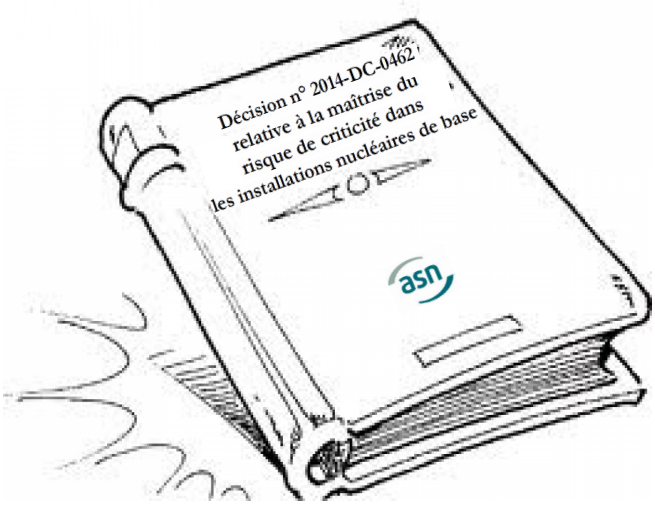
FICHE N°2

PRINCIPES DE L'ANALYSE DE SÛRETÉ-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.

La sûreté-criticité

⇨ Le risque de criticité est inhérent aux **installations et opérations mettant en œuvre des matières fissiles** :

- Installations du cycle du combustible ;
- Installations de recherche et développement ;
- Installations de stockage ;
- Réacteurs nucléaires ;
- Transports de matières fissiles.

⇨ Par principe, **l'accident de criticité doit être considéré hors dimensionnement**. En effet, il ne présente aucun signe précurseur et il n'est pas possible de le détecter tant que le k_{eff} du système est strictement inférieur à 1.

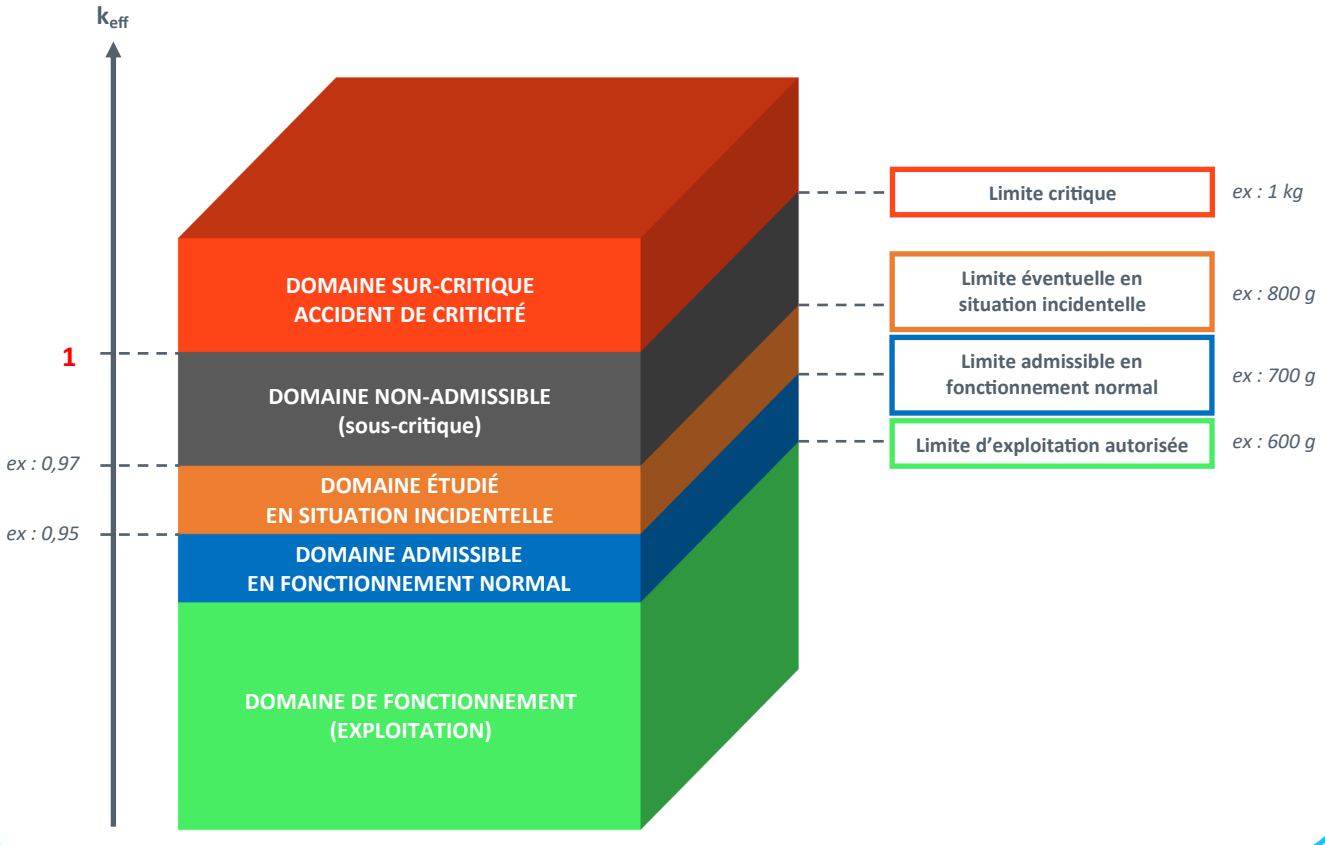
⇨ À cet effet, la **sûreté-criticité** est définie comme **l'ensemble des dispositions techniques et organisationnelles prévues pour assurer la maîtrise du risque de criticité**, que ce soit :

- Dans le cas des **situations normales** de fonctionnement, y compris les phases transitoires d'exploitation et les opérations de maintenance ;
- Dans le cas des **situations incidentelles**, qui doivent être prises en compte.

⇨ L'**objectif** de la sûreté-criticité est de garantir, à tout instant, l'absence de risque de déclenchement d'une réaction de fission en chaîne dans une unité de travail, un équipement, etc…. C'est également, dans l'hypothèse d'un éventuel accident de criticité à un poste de travail, un équipement…, d'en minimiser les conséquences radiologiques sur le personnel et l'environnement.

⇨ Pour cela, la démarche de sûreté-criticité doit être **prudente** et retenir des **hypothèses conservatives**, vis-à-vis des situations normales et incidentelles, de sorte à garantir des **marges suffisantes** vis-à-vis du risque d'accident. En fonction de ces situations, les domaines de fonctionnement peuvent être différents.

⇨ Le schéma ci-après illustre cette notion de domaines de fonctionnement vis-à-vis du risque de criticité, avec des exemples de critères de k_{eff} usuels et leur traduction en limites d'un paramètre de sûreté-criticité (cas d'une masse de matières fissiles).



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.

Démonstration de sûreté pour le risque de criticité

⇨ **L'analyse de sûreté-criticité** inclut les démonstrations de sûreté et la présentation des dispositions de construction et d'exploitation associées permettant d'assurer, dans l'ensemble des configurations normales et anormales de l'installation, la maîtrise du risque de criticité.

⇨ Les principes de l'analyse de sûreté-criticité font l'objet de la **décision ASN 2014-DC-0462**, dite « décision criticité ». Celle-ci s'applique à ***« l'ensemble des INB dans le périmètre desquelles de la matière fissile est présente, à l'exclusion de celles dans lesquelles la criticité est physiquement impossible ».*** Cette décision reprend un grand nombre de principes énoncés dans la **Règle Fondamentale de Sûreté (RFS) I.3.c** du 18/10/1984.

⇨ Une **analyse de sûreté-criticité** peut être structurée de la manière suivante :

1. Objet de l'analyse de sûreté-criticité
2. Organisation et formation
3. Matières fissiles mises en œuvre
4. Présentation des modes de contrôle et des paramètres associés par unité fonctionnelle
5. Choix du (des) milieu(x) fissile(s) de référence
6. Présentation des valeurs critiques et admissibles de référence du (des) milieu(x) fissile(s) de référence
7. Étude des configurations normales : présentation des dispositions à mettre en œuvre pour garantir les milieux fissiles de référence, les modes de contrôles et les paramètres de sûreté-criticité associés
8. Étude des configurations anormales pouvant remettre en cause les milieux fissiles de référence ou les modes de contrôle retenus
9. Étude des accidents de criticité (le cas échéant — voir fiche n°21)

Nota : L'analyse n'est pas séquentielle, chacun des points ci-dessus pouvant avoir un impact sur un autre. Par exemple :

- Le choix du mode de contrôle peut avoir une influence sur le milieu fissile de référence ;
- L'étude des configurations anormales peut amener à modifier le mode de contrôle ou le milieu fissile de référence.

1. Objet de l'analyse de sûreté-criticité

⇨ L'analyse de sûreté-criticité doit commencer par une description détaillée de l'objet de l'étude. Les informations suivantes peuvent être fournies dans une analyse de sûreté-criticité.

⇨ Préciser le **contexte de l'étude** : s'agit-il d'une nouvelle installation ou d'une modification d'installation existante ? Quel est le périmètre de l'installation ? Quelles sont les interfaces avec les autres parties de l'installation ?

⇨ Faire une **description** de tous les éléments de l'installation ou du procédé qui peuvent avoir un impact important sur la compréhension de l'installation, du procédé ou sur la démonstration de sûreté :

- Description des installations (situation des locaux, implantation des équipements, ...) ;
- Description des équipements (dimensions, principes de fonctionnement, ...), des circuits annexes (notamment les fluides hydrogénés présents dans les circuits de chauffe ou de refroidissement, les huiles, …) et des circuits de secours (extinction incendie, …) ;
- Description du ou des procédés mis en œuvre (procédés chimiques, traitements mécaniques,…), éventuellement les gammes de maintenance des appareils (procédures de nettoyage, de rinçage,…) ;
- Description des matières mises en œuvre : matières fissiles et autres matières intervenant dans les procédés ou présentes dans l'installation (matériaux de structures, parois…).

⇨ Présenter le **fonctionnement** de l'installation étudiée :

- Domaine de fonctionnement normal et/ou nominal (y compris transitoires d'exploitation et opérations de maintenance) ;
- Anomalies et dispositions mises en œuvre pour revenir dans le domaine de fonctionnement normal.

⇨ Présenter les **configurations anormales** (incidents, accidents) qui peuvent avoir un impact sur la sûreté-criticité de l'installation.

Nota :

- La maîtrise du fonctionnement et des procédés mis en œuvre constitue un premier élément de garantie vis-à-vis de la sûreté-criticité ;
- Le niveau de détail de la description doit être proportionné au contexte de l'étude (phase d'avant-projet, phase de réalisation, exploitation…).

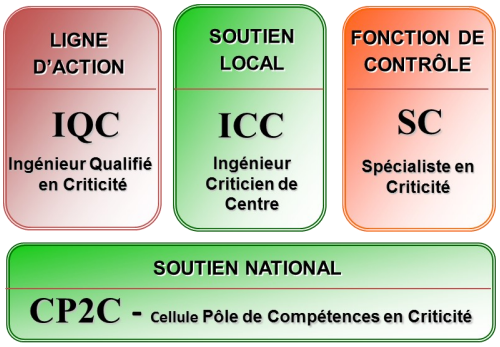
Ce document, élaboré pour la réalisation d'études de sûreté-criticité, est la propriété du CEA. Il ne se substitue en aucun cas à une analyse de sûreté-criticité ou à l'avis d'un ingénieur criticien et ne peut pas servir de référence directe.

2. Organisation et formation

⇨ Présentation des moyens organisationnels et humains mis en œuvre (voir schéma ci-contre pour le CEA) :

⇨ Cette partie peut faire l'objet d'un renvoi aux RGE de l'installation.

> 🕮 *Décision criticité, Titre IV : Organisation des exploitants*



⇨ Les documents réglementaires pour les INB/INBS sont :

- L'arrêté du 07/02/2012, dit « arrêté INB » ;
- La décision ASN 2014-DC-0462 du 07/10/2014, dite « décision criticité », applicable aux INB ;
- L'arrêté du 26/09/2007 (article 25) applicable aux INBS.

⇨ Les documents applicables au CEA sont :

- La circulaire DPSN n°10 (organisation au CEA) ;
- La circulaire DPSN n°13 (qualification et habilitation pour les postes importants pour la sûreté) ;
- + documents, circulaires, procédures... spécifiques à un **centre** ou à une **installation**.

⇨ Autres documents non réglementaires :

- La Règle Fondamentale de Sûreté (RFS) I.3.c du 18/10/1984 ;
- Les normes/guides internationaux (ISO, ANSI/ANS, AIEA…) ;
- Le projet de guide ASN/IRSN de déclinaison de la « décision criticité » (à paraître).

3. Matières fissiles mises en œuvre

⇨ L'analyse de sûreté-criticité doit présenter les **matières fissiles** mises en œuvre dans l'installation de façon détaillée. Cette présentation doit permettre de vérifier que le milieu fissile de référence retenu est bien enveloppe de l'ensemble des milieux fissiles pouvant être rencontrés dans l'installation, pour le mode de contrôle retenu.

⇨ Les données nécessaires à la description de la matière fissile sont :

- Sa **composition** (isotopes fissiles et non fissiles, composition isotopique, avec ou sans irradiation) ;
- Sa **forme physico-chimique** (métal, oxyde fritté, oxyde pulvérulent, nitrate, hexafluorure…) et les paramètres associés (ex : densité) ;
- Sa **répartition** : homogène (solutions, poudres…) ou hétérogène (crayons, plaques…).

4. Présentation des modes de contrôle et des paramètres associés par unité fonctionnelle

⇨ La notion de **mode de contrôle** est définie par la décision criticité comme ***« une limite imposée à l'un ou plusieurs des paramètres suivants :***

- ***Masse de matières fissiles*** [mode de contrôle usuellement dénommé « masse »] ***;***
- ***Dimensions géométriques*** [mode de contrôle usuellement dénommé « géométrie »] ***;***
- ***Concentration ou teneur en matières fissiles dans des milieux donnés considérés comme homogènes*** [mode de contrôle usuellement dénommé « concentration »] ***;***
- ***Quantité ou teneur en matières modératrices*** [mode de contrôle usuellement dénommé « modération »] ***;***
- ***Concentration ou teneur en poisons neutroniques dans le milieu fissile ou dans un matériau externe associée à la composition et aux dimensions de ce matériau*** [mode de contrôle usuellement dénommé « empoisonnement »]. ***»***

⇨ « ***Ces limites sont fixées pour un milieu fissile de référence, en tenant compte de l'environnement réflecteur et des interactions neutroniques.*** »

> 🕮 *Décision criticité, Titre III, Chapitre I^er^, Article 3.1.2*

> ☞ *Pour plus d'informations sur la définition des modes de contrôle : voir fiche n°3*

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 limites imposées par le mode de contrôle retenu induisent, selon les cas :

- Des **contraintes de dimensionnement** pour les appareils ou les bâtiments (respect de cotes géométriques et de distances entre équipements, dispositif de ventilation d'enceintes par air surséché…) ;
- Des **contraintes d'exploitation** (respect de masses maximales, de concentrations maximales…).

⇨ Les études de criticité et les notes de calcul à réaliser sont définies par les modes de contrôle retenus. Ces études ont pour objectif de calculer les valeurs limites des paramètres.

Nota : Selon les cas, les limites imposées aux paramètres associés aux modes de contrôle peuvent être des valeurs :

- Maximales : masse ou concentration maximale en matières fissiles, volume d'eau maximal…
- Minimales: distance minimale d'éloignement, concentration minimale d'un poison neutronique...

⇨ Le choix du mode de contrôle peut être influencé par les matières fissiles en présence (voir fiche n°4).

⇨ Le choix du mode de contrôle et des paramètres à limiter a des conséquences sur le domaine de fonctionnement de l'installation et doit être cohérent avec le **rapport de sûreté,** le domaine de fonctionnement défini au **chapitre 4 des RGE,** la conduite et la surveillance en fonctionnement normal et transitoire (**chapitre 5 des RGE**) et les consignes de criticité (**chapitre 9 des RGE**). À défaut, une mise à jour de ces documents doit être réalisée.

5. Choix du (des) Milieu(x) Fissile(s) de Référence (MFR)

⇨ Le **milieu fissile de référence** est défini par la décision criticité comme le **« *milieu fissile enveloppe en termes de réactivité de ceux susceptibles d'être présents dans l'installation et conduisant, suite à l'étude des configurations normales et anormales, aux limites associées aux paramètres de criticité les plus pénalisants compte tenu du mode de contrôle retenu* »**.

Décision criticité, Titre I : Définitions

⇨ Le milieu fissile de référence est défini par :

- **Une matière fissile** (voir description au § 3) ;
- **Une matière modératrice** (eau, graphite, plastique (CH_2)...) et sa répartition (homogène ou hétérogène) ;
- **Une loi de dilution**.

Pour plus d'informations sur la définition du milieu fissile de référence : voir fiche n°4
Pour plus d'informations sur les lois de dilution : voir fiche n°5

⇨ Le choix du (des) milieu(x) fissile(s) de référence est une étape importante de l'analyse de sûreté-criticité. Il a des conséquences sur le domaine de fonctionnement de l'installation et il doit être cohérent avec les matières mises en œuvre définies notamment dans le **rapport de sûreté** et au **chapitre 4 des RGE** (domaine de fonctionnement). À défaut, une mise à jour de ces documents doit être réalisée.

⇨ Le milieu fissile de référence retenu peut être différent de la matière fissile mise en œuvre en fonctionnement normal et peut intégrer des dysfonctionnements potentiels.

6. Présentation des valeurs critiques et admissibles de référence du (des) milieu(x) fissile(s) de référence

⇨ Il est intéressant de présenter, pour chaque milieu fissile de référence retenu, les valeurs critiques, admissibles et sûres de paramètres simples (voir page 6), obtenues par des calculs de **normes**. Pour des configurations simples, les normes permettent de définir directement les paramètres de sûreté associés au mode de contrôle retenu :

- Masse maximale ;
- Dimensions maximales (volume de sphère, diamètre de cylindre, épaisseur de plaque) ;
- Concentration maximale...

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.

7. Étude des configurations normales (« fonctionnement normal ») : présentation des dispositions à mettre en œuvre pour garantir les milieux fissiles de référence, les modes de contrôles et les paramètres associés

⇨ Ce chapitre a pour objet de présenter l'ensemble des dispositions à mettre en œuvre pour garantir les modes de contrôle ainsi que la compatibilité des milieux fissiles mis en œuvre par rapport au milieu fissile de référence. Il s'agit généralement de dispositions constructives ou de contraintes opérationnelles (voir **fiches n°7 à 14**).

⇨ Ces dispositions se retrouvent généralement dans :

- Les **consignes d'exploitation, aux chapitres 5 (conduite en situation normale) et 9 (consignes de criticité) des RGE**, pour les modes de contrôles induisant des contraintes d'exploitation (masse, modération...) ;
- Les **fiches de criticité,** pour les modes de contrôle par la géométrie et l'empoisonnement hétérogène ;
- Les **spécifications techniques** (anciennement appelées « prescriptions techniques »).

8. Étude des configurations anormales pouvant remettre en cause les milieux fissiles de référence ou les modes de contrôle retenus

⇨ Ce chapitre intègre l'étude des configurations anormales. Cette analyse doit permettre de montrer que les dispositions mises en œuvre (§ 7) satisfont le **principe de double défaillance** issu de la RFS I.3.c et repris, pour les INB, dans la décision criticité :

- ***« Un accident de criticité ne doit en aucun cas découler d'une seule anomalie ;***
- ***Si un accident de criticité peut découler de l'apparition concomitante de deux anomalies, il est alors démontré que :***
  - ***Les deux anomalies sont indépendantes,***
  - ***La probabilité d'occurrence de chacune des anomalies est suffisamment faible,***
  - ***Chaque anomalie est mise en évidence à l'aide de moyens appropriés et fiables, permettant la réparation ou la mise en place de mesures compensatoires dans un délai adéquat. »***

📖 *Décision criticité, Titre II, Article 2.3*

À défaut, de nouvelles dispositions doivent être mises en œuvre pour respecter ce principe.

Nota : Une dérogation au principe de double défaillance est possible **sous conditions** (cf. article 2.4 de la décision criticité).

⇨ Une **anomalie** est définie comme un **événement déclencheur** ou un **écart**, au sens de l'arrêté INB du 07/02/2012.

- Les événements déclencheurs sont de plusieurs types :
  - Défaillance interne (dysfonctionnement de procédé, panne ou endommagement d'un élément) : fuites et transferts de matières inopinés, réactions chimiques indésirables (précipitation, extraction par solvant…), changements physiques (évaporation, augmentation de densité…), corrosion...
  - Agression interne : chute de charge ou collision, incendie, explosion…
  - Agression externe : séisme, inondation…
- Les écarts constituent un non-respect d'une exigence définie ou d'une exigence fixée par le système de management intégré.

⇨ Pour la sûreté-criticité, il convient d'étudier l'ensemble des configurations anormales susceptibles de :

- Remettre en cause les **modes de contrôle**, i.e. entraîner un dépassement des limites définies pour chaque paramètre contrôlé *(ex : cas d'une fuite d'eau en contrôle par la modération)* ;
- Remettre en cause le **milieu fissile de référence** dans sa forme physico-chimique ou dans ses propriétés *(ex : précipitation de matière fissile pour un milieu fissile sous forme de nitrate)* ;
- Modifier les **conditions de réflexion ou d'interaction** entre les unités de criticité *(ex : inondation)* ;
- Entraîner des **rétentions** ou des **entraînements** de matières fissiles non souhaités *(ex : transfert de matières fissiles dans un circuit inactif)*.

⇨ Ces études peuvent amener à définir des **modes de contrôle secondaires** et/ou à réaliser des **calculs spécifiques.**

⇨ Les conclusions doivent être cohérentes avec les actions mises en œuvre pour atteindre un état sûr, définies au **chapitre 6 des RGE** (conduite en situation incidentelle) et avec le **chapitre 9 des RGE** (consignes de criticité). À défaut, une mise à jour de ces documents doit être réalisée.

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.

Marges de sûreté

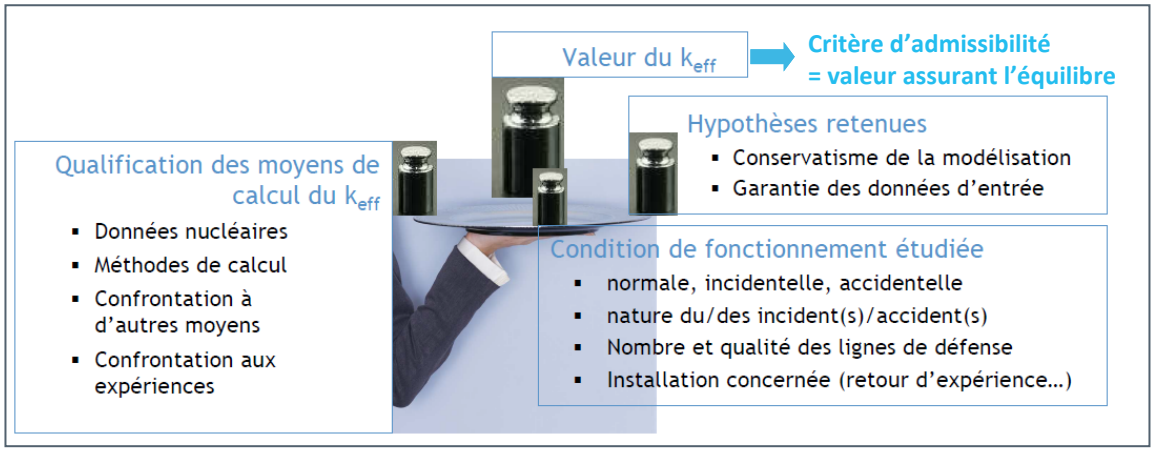
⇨ ***« Les limites de criticité sont définies de telle sorte que les facteurs de multiplication effectifs (k_{eff}), toutes incertitudes de calcul comprises, soient inférieurs à 1 avec une marge suffisante. La valeur de cette marge est justifiée en fonction de la configuration étudiée (normale ou anormale), de la sensibilité de la valeur du k_{eff} aux paramètres de l'étude de criticité et du degré de conservatisme des hypothèses de calculs considérées. »***

📖 *Décision criticité, Titre III, Chapitre II, Article 3.1.2*

⇨ En conséquence, il est nécessaire de garantir une **marge de sûreté** par rapport aux valeurs critiques obtenues par les codes de calculs de criticité, dans les configurations normales et anormales. Ces marges doivent tenir compte :

- Du **degré de conservatisme des hypothèses** retenues dans les calculs ;
- Du degré de **qualification du code de calcul** utilisé, par rapport aux expériences critiques (benchmark) et aux biais de calcul systématiques.

☞ *Pour plus d'informations sur les codes de calcul et leur qualification : voir fiche n°6*



⇨ La réglementation ne fixe aucune valeur. **L'exploitant est responsable de la maîtrise du risque de criticité dans son installation : il doit apprécier et quantifier les marges dont il dispose et justifier les valeurs de k_{eff} qu'il choisit.**

DÉFINITION DES VALEURS DE RÉFÉRENCE ET DES LIMITES :

⇨ **Valeur critique** : valeur d'un paramètre de criticité au-dessous/au-dessus de laquelle, pour des conditions de modération et de réflexion données, un milieu fissile reste sous-critique. Elle correspond à un **k_{eff} de 1** (seule cette notion est sans ambiguïté, hors toute considération due à la qualification ou aux biais des calculs) ;

⇨ **Valeur sûre** : valeur d'un paramètre de criticité égale à la valeur minimale critique multipliée par un **coefficient de sécurité** (approche française historique). Les coefficients standard sont :

Paramètre	Masse	Volume sphérique	Diamètre de cylindre	Épaisseur de plaque	Concentration	Densité surfacique
Coefficient de sécurité standard	0,70 0,43 si double chargement	0,75	0,85	0,75	0,80	0,70

⇨ **Valeur admissible** : valeur d'un paramètre de criticité qui correspond à un **critère d'admissibilité** (valeur spécifique de k_{eff}). Les marges usuelles prises pour le critère d'admissibilité, compte tenu des incertitudes de calcul (le cas échéant), sont :

- En configuration normale (au sens de la sûreté-criticité) : **k_{eff} = 0,95** ;
- En configuration anormale (au sens de la sûreté-criticité) : **k_{eff} = 0,97 à 0,98**.

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.

⇨ La **limite de sûreté-criticité**, qui peut différer en configuration normale ou anormale, se définit ainsi :

Limite de sûreté-criticité	**= minimum {valeur sûre ; valeur admissible}** **ou** **= valeur sûre ou valeur admissible** (avec une justification de sûreté-criticité)

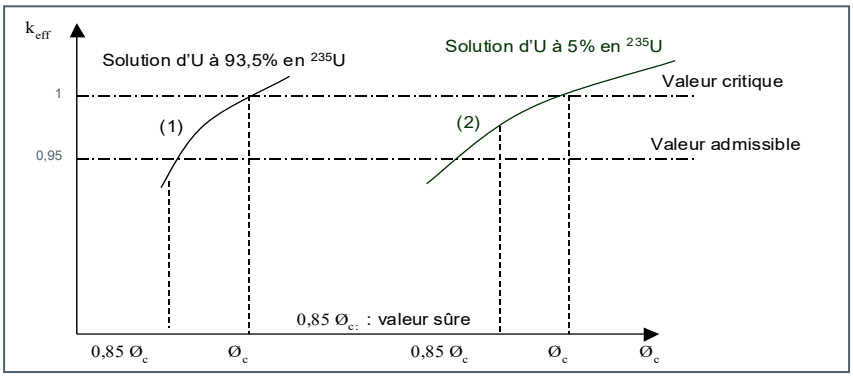
⇨ La **limite d'exploitation** se définit ainsi :

Limite d'exploitation ≤ Limite de sûreté-criticité retenue pour les configurations normales

Nota : Les définitions de valeurs sûres et admissibles ne sont pas standardisées, de même que celles des limites de sûreté-criticité et d'exploitation ; il est impératif de définir ces différents termes dans les justifications de sûreté-criticité.

ATTENTION À ÉVALUER CORRECTEMENT LES MARGES :

⇨ Pour ce qui concerne le calcul de normes, il convient de souligner que la marge de sûreté réelle, par rapport à l'état critique, dépend du comportement de la courbe de variation du k_{eff} en fonction du paramètre critique.



Variation du k_{eff} en fonction du diamètre d'un cylindre de hauteur infinie
- Φ_C = diamètre critique
- 0,85 Φ_C = diamètre sûr

⇨ La courbe correspondant à un milieu faiblement enrichi (2) montre bien que, prendre la marge de sécurité en appliquant le coefficient 0,85 sur la valeur du diamètre critique du cylindre de hauteur infinie conduit à un k_{eff} élevé, supérieur à 0,95.

Nota : Pour les milieux très faiblement enrichis, la masse sûre peut correspondre à un k_{eff} très élevé. Par exemple, pour de l'U métal enrichi à 1,05% en ^{235}U, modéré par de l'eau et réfléchi par 20 cm d'eau, la masse sûre correspond à un k_{eff} de l'ordre de 0,995.

⇨ Ainsi, il faut faire attention :

- Aux valeurs sûres, qui peuvent, dans certains cas, entrainer un k_{eff} proche de 1 ;
- Aux valeurs admissibles, qui peuvent entrainer des limites admissibles proches des limites critiques.

⇨ En conséquence, il ne faut pas imposer systématiquement un coefficient de sécurité ou une valeur prédéterminée de k_{eff}, mais fixer et **justifier, dans la démonstration de sûreté, les marges de sûreté** vis-à-vis du risque de criticité en fonction du degré de conservatisme des hypothèses prises en considération dans les calculs de criticité et du degré de confiance des résultats obtenus (état de la qualification du code).

☞ *Pour plus d'informations sur la qualification des voies de calcul : 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.