

## GUIDE D'ANALYSE

### LES RISQUES DE CRITICITE ET LEUR PREVENTION DANS LES USINES ET LES LABORATOIRES

DSU/SEC/T/2010-105 - Indice A

DIRECTION DE LA SURETE DES USINES,  
DES LABORATOIRES, DES TRANSPORTS  
ET DES DECHETS

Service d'expertise, d'études et de recherche en criticité


Demandeur	IRSN
Référence de la demande	
Numéro de la fiche d'action	AF 08.65
Référence du rapport	DSU/SEC/T/2010-105 - Indice A






**GUIDE D'ANALYSE**

**LES RISQUES DE CRITICITÉ ET LEUR PRÉVENTION DANS LES USINES  
 ET LES LABORATOIRES**

Cette note est un support à la réalisation ou à l'expertise d'une analyse des risques de criticité. Après une introduction de ces risques, de leurs principes de prévention dans les usines et les laboratoires et un rappel de la règle fondamentale de sûreté (RFS) n° I.3.c, elle présente, sous forme de diagrammes, d'une part la méthodologie préconisée par cette RFS, d'autre part, pour le milieu fissile de référence et chaque mode de contrôle de la criticité, les paramètres devant être pris en compte dans l'analyse, les défaillances à étudier et les scénarios types associés à ces défaillances, sans pour autant prétendre à l'exhaustivité.

**VU LE R.Q.S.**

Date : 27/07/2010	Visa 
Nom : GOMIT J.N.	

	Réservé à l'unité			Visas pour diffusion	
	Auteur(s)	Vérificateur(s)*	Laboratoire ou bureau	Chef d'unité	Directeur général de l'IRSN
Noms	I. LE BARS C. GALET	S. EVO	S. EVO	E. LETANG	P. COUSINOU par délégation
Dates	01/12/2008	19/04/2010	19/04/2010	30/04/2010	23/06/2010
Signatures					

\*rapport sous assurance de la qualité

DIFFUSION : Libre  Interne  Limitée

---

**HISTORIQUE DES MODIFICATIONS**

Version	Date	Auteur	Pages ou paragraphes modifiés	Description ou commentaires
A	27/07/2010	I. LE BARS, C. GALET		Ont contribué à la réalisation de ce guide d'analyse : Patrick Cousinou, Véronique Rouyer, Christophe Barrière, Régis Cousin, Gilles Daumen, Fabien Duret, Stéphanie Kanamori et Julien Rannou.

---

**RESUME / ABSTRACT**

---

**MOTS-CLES**

Criticité, prévention, guide, analyse, RFS I.3.c

## SOMMAIRE

0. PREAMBULE.....	6
1. LE RISQUE DE CRITICITE.....	7
2. PARAMETRES INFLUENÇANT LE BILAN NEUTRONIQUE.....	8
2.1. Bilan neutronique.....	8
2.2. Production des neutrons de fission.....	10
2.3. Fuite des neutrons.....	11
2.4. Absorption des neutrons .....	12
3. LA PREVENTION DES RISQUES DE CRITICITE (MODES DE CONTROLE DE LA CRITICITE ET MILIEUX FISSILES DE REFERENCE) .....	13
4. ANALYSE DE LA SURETE-CRITICITE .....	13
5. MARGES DE SECURITE ET CRITERES DE DIMENSIONNEMENT .....	14
6. LIMITER LES CONSEQUENCES D'UN ACCIDENT DE CRITICITE .....	15
7. RESEAU DE DETECTION ET D'ALARME DE CRITICITE.....	15
8. EVACUATION .....	16
9. INTERVENTION EN CAS D'ACCIDENT DE CRITICITE .....	16
10. CONCLUSION : RIGUEUR, RESPECT DES PRINCIPES ET VIGILANCE .....	16

## REFERENCES

- [1] Précis de neutronique - Paul Reuss - Collection Génie Atomique - INSTN - 2003
- [2] Que sais-je ? La neutronique - Paul Reuss - Puf - 1998
- [3] LA-13638 - A Review of Criticality Accidents (Révision de 2000) - Los Alamos

## 0. PREAMBULE

Cette note présente dans un premier temps les risques de criticité, les principes de prévention adoptés dans les usines et les laboratoires et rappelle la règle fondamentale de sûreté (RFS) n° I.3.c. Ensuite, sont introduits, sous forme de diagrammes, d'une part la méthodologie préconisée par cette RFS, d'autre part, pour chaque mode de contrôle de la criticité, les paramètres devant être pris en compte « **classiquement** » dans l'analyse, les défaillances « **types** » à étudier et les scénarios « **usuels** » associés à ces défaillances.

Ces diagrammes, développés par l'IRSN et susceptibles d'évoluer avec le retour d'expérience acquis lors de l'exploitation des installations ou la réalisation d'analyses ou d'expertises, constituent un guide d'analyse des risques de criticité, que ce soit pour la constitution de dossiers de sûreté ou pour l'expertise de ces derniers.

A l'égard des possibilités d'évolution de ce guide, une fiche de proposition de modification, destinée aux utilisateurs du guide, est disponible en dernière page de cette note.

Enfin, ce guide n'est que la synthèse des « classiques » et « incontournables » de la prévention des risques de criticité. Si leur prise en compte est une nécessité, le lecteur ne doit jamais oublier que chaque configuration est un cas particulier et que des scénarios spécifiques à ce cas particulier peuvent exister. Il est bon de rappeler ici que tous les accidents de criticité ont découlé de défaillances et de scénarios incidentels qui n'avaient pas été pris en compte dans l'analyse.

Le présent guide constitue donc un outil d'aide, qui n'a pas vocation à être exhaustif, et ne saurait remplacer la nécessaire analyse à adapter à chaque situation.

*« L'exception est de l'art aussi bien que la règle, l'une en défend et l'autre  
en étend le domaine »*

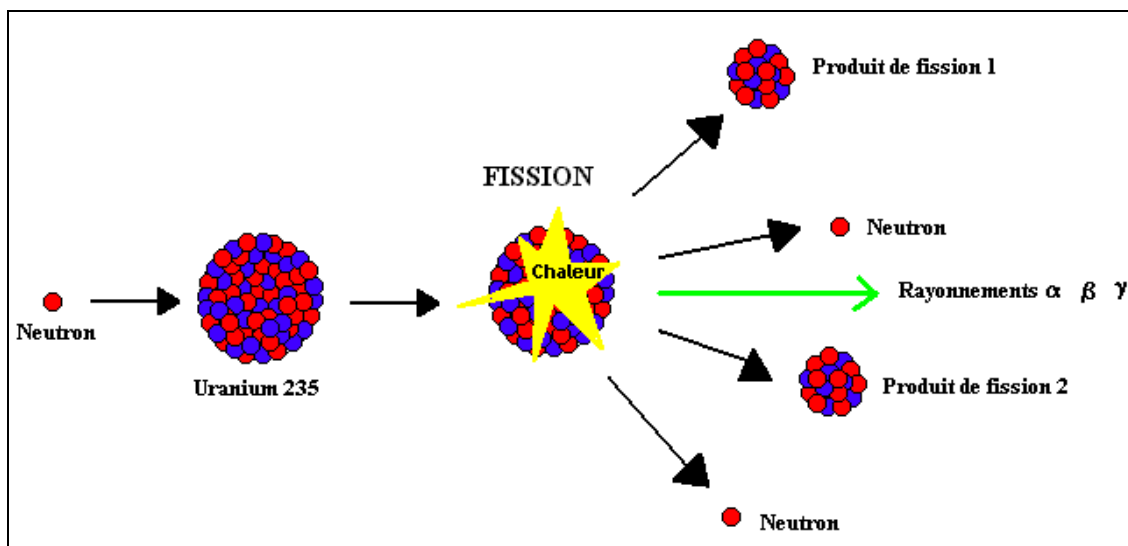
(Joseph JOUBERT)

## 1. LE RISQUE DE CRITICITE

Certains éléments, comme l'isotope 235 de l'uranium ou les isotopes 239 et 241 du plutonium, présentent la propriété de pouvoir fissionner, c'est-à-dire de se diviser en deux fragments (appelés produits de fissions). Cette réaction nucléaire peut être « spontanée » ou « induite » par une particule (un neutron) interagissant avec l'élément.

Une réaction de fission entraîne un dégagement d'énergie, la production de rayonnements gamma et l'émission de neutrons (2 à 3 en moyenne) qui, à leur tour, pourront éventuellement induire de nouvelles fissions (cf. figure 1). Les milieux constitués de ces éléments peuvent donc être le siège de réactions de fission en chaîne.

Figure 1 : réaction de fission de l' $^{235}\text{U}$



Lorsque chaque fission entraîne en moyenne plus d'une, le nombre de fissions, et donc les rayonnements ionisants, augmentent de manière exponentielle (on parle alors de réaction en chaîne divergente). Si un tel phénomène se produit de manière accidentelle dans une installation nucléaire (usines, laboratoires) ou dans un moyen de transport de matières fissiles, il peut causer une irradiation grave, voire létale, des personnes se trouvant à proximité de l'équipement concerné. On parle alors d'accident de criticité, qui, en outre, entraîne la production de produits de fission, dont certains sous forme gazeuse. Ces produits de fission peuvent conduire à un rejet radioactif, en général limité, dans l'environnement.

Aussi, il est impératif de prévenir l'atteinte de conditions pouvant conduire à une réaction de fission en chaîne divergente (ou configuration sur-critique). Ce domaine de la sûreté des installations nucléaires lié à la prévention des risques de criticité est couramment dénommé « sûreté-criticité ».

Les risques de criticité sont considérés dans toutes les étapes du cycle du combustible mettant en œuvre du plutonium, de l'uranium dès lors que l'enrichissement en  $^{235}\text{U}$  dépasse 1% et/ou certains actinides mineurs (curium, américium...): usines d'enrichissement et de conversion de l'uranium, usines de fabrication des combustibles à base de plutonium et/ou d'uranium, usines de traitement de combustibles irradiés, laboratoires d'étude mettant en œuvre des matières fissiles, installations de traitement

d'effluents et de conditionnement de déchets, entreposages et transports de matières fissiles (combustibles, déchets radioactifs...).

Il n'est pas nécessaire de disposer d'une machine complexe ni de quantités importantes de matières fissiles pour amorcer une réaction de fission en chaîne divergente. Environ 0,5 kg de plutonium 239 ou 48 kg d'uranium, tel que celui utilisé pour fabriquer les combustibles des centrales d'EDF, peuvent suffire en présence d'eau, dans une configuration géométrique sphérique. A titre de comparaison, un assemblage combustible EDF (REP 17 x 17) renferme plus de 400 kg d'uranium dans une configuration géométrique spécifique adaptée. A contrario, il est possible de manipuler des quantités relativement importantes de matières fissiles, à condition de respecter strictement un ensemble de paramètres garantissant que les conditions de la criticité ne seront pas réunies.

L'analyse des risques de criticité a pour objectif de définir les dispositions constructives et d'exploitation, nécessaires et suffisantes pour prévenir le déclenchement d'une réaction de fission en chaîne divergente en présence de matières fissiles.

De manière schématique, l'analyse des risques de criticité consiste à mettre en lien, d'une part les configurations dans lesquelles peuvent se trouver les matières fissiles compte tenu des actions envisageables lors des opérations, des modifications pouvant être induites par d'éventuelles défaillances (erreur, défaillance d'un composant...) ou par les situations accidentelles (incendie, séisme...), d'autre part les marges entre ces configurations et celles potentiellement critiques. C'est en contrôlant strictement ces actions que la sûreté est assurée.

Ainsi, les risques de criticité sont maîtrisés au moyen de dispositions préventives destinées à contrôler les configurations dans lesquelles se trouve la matière fissile. Ces dispositions se traduisent en pratique par des contraintes opérationnelles consistant, par exemple, à limiter les quantités de matières manipulées, les dimensions des appareils contenant les matières fissiles et/ou la concentration en matières fissiles dans les milieux liquides ou à avoir recours à des matériaux spécifiques appelés poisons neutroniques.

En complément, en fonction des spécificités des installations, des systèmes de détection et d'alarme de criticité peuvent être mis en place de façon à permettre l'évacuation rapide du personnel. Toutefois, ces systèmes ne se déclenchent qu'après l'amorçage de la réaction en chaîne et ne permettent pas d'éviter les irradiations associées aux premiers instants de l'accident (qui peuvent induire des doses létales pour les opérateurs à proximité). En revanche, les conséquences pour l'environnement d'un tel accident sont d'ampleur limitée ; notamment, les rejets de produits de fission radioactifs ne comportent que quelques gaz rares et très peu d'iode. Par ailleurs, les rayonnements sont atténués par les murs et protections radiologiques et décroissent avec la distance.

Dans la suite de ce texte, sont présentés les principaux aspects de l'analyse de la prévention des risques de criticité.

L'utilisateur du guide pourra, pour approfondir ses connaissances, consulter par exemple les documents cités en références [1] à [3].

## **2. PARAMETRES INFLUENÇANT LE BILAN NEUTRONIQUE**

### **2.1. Bilan neutronique**

L'une des étapes importantes dans l'analyse des risques de criticité est de définir, en fonction des configurations rencontrées et des actions ou opérations envisageables, la configuration la plus pénalisante pour la matière fissile. L'identification et la définition

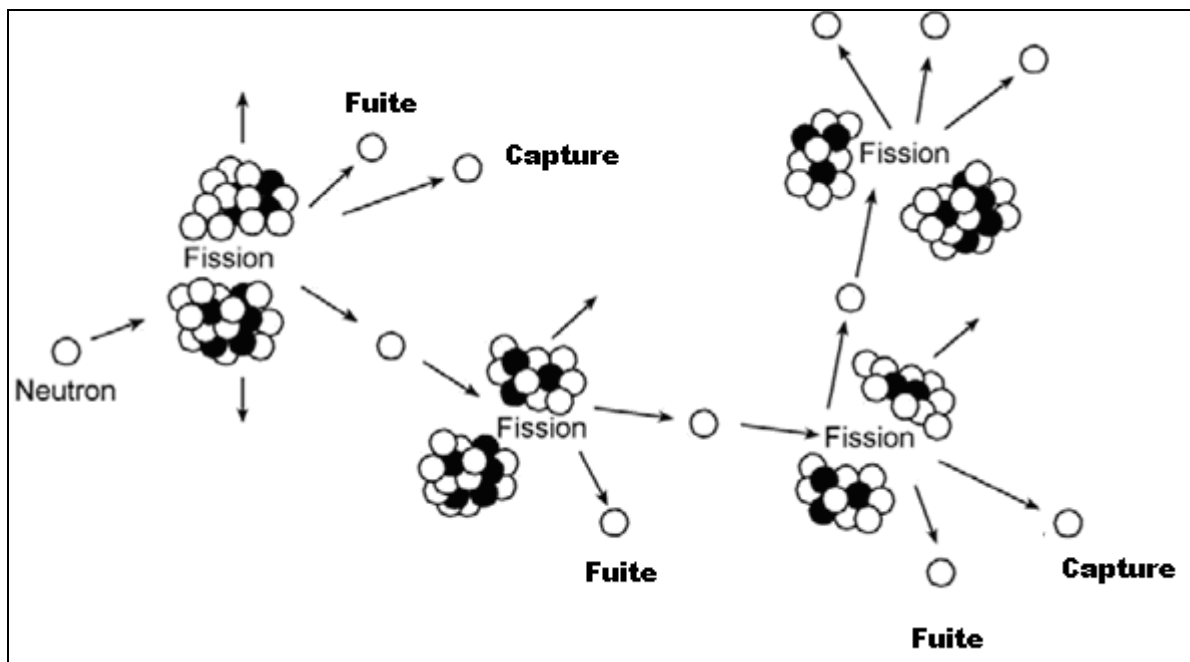


précise de cette configuration s'appuie, bien évidemment, sur une connaissance des phénomènes de base de la neutronique.

La fission du noyau d'un atome fissile (uranium 235, plutonium 239, plutonium 241...), provoquée par un neutron, libère plusieurs neutrons, 2 à 3 en moyenne. Les phénomènes neutroniques (liés aux interactions matière-neutrons) concernent un très grand nombre de noyaux et font intervenir des notions de probabilité (ou section efficace, c'est-à-dire la probabilité d'interaction du neutron pour une réaction donnée). Les neutrons ainsi émis, après diffusion dans la matière, ont trois destins possibles (cf. figure 2) :

- être absorbés par des noyaux fissiles et provoquer de nouvelles fissions (peut être qualifié de capture fissile) ;
- être absorbés par des noyaux et « rester » dans le noyau, qui change alors de numéro atomique. Dans certains cas, la réaction peut conduire à la production d'un noyau fissile ; c'est par exemple le cas avec l'uranium 238, qui se transforme, après plusieurs réactions nucléaires, en plutonium 239 (on qualifie cette capture de fertile). Dans une majorité des cas, la réaction conduit à la production d'un noyau non fissile ; c'est par exemple le cas du bore 10 (20 % du bore naturel) qui se transforme en bore 11 (on qualifie cette capture de stérile) ;
- s'échapper du système concerné (fuites), par exemple du réservoir contenant la solution fissile.

**Figure 2 : bilan neutronique**



Ainsi, des neutrons provoquent des fissions lesquelles engendrent des neutrons qui à leur tour peuvent provoquer d'autres fissions (captures fissiles) et ainsi de suite. Cette production de neutrons, si elle n'est pas compensée par une perte suffisante (par captures fertiles ou stériles et/ou fuites), conduit à une augmentation exponentielle du nombre de neutrons et à l'accident de criticité.

La grandeur caractéristique de l'état « neutronique » d'une configuration est le bilan entre ses capacités, d'une part à produire des neutrons par fission, d'autre part à en perdre par captures fertiles et stériles et/ou par fuite. Ce bilan est exprimé par le facteur de multiplication effectif des neutrons (généralement noté keff), qui exprime le facteur par lequel le nombre de fissions se trouve multiplié d'une génération de neutrons à la suivante.

$$k_{eff} = \frac{N'}{N} = \frac{Production}{Absorption + Fuite}$$

où N est le nombre de « neutrons pères » (génération n - 1) ayant disparu par absorption ou fuite et ayant donné naissance à N' « neutrons fils » (génération n).

- Si  $k_{eff} < 1$  (Production < Absorption + Fuite), la configuration est sous-critique ; c'est l'état sûr recherché pour les installations nucléaires (hors réacteur).
- Si  $k_{eff} = 1$  (Production = Absorption + Fuite), la configuration est critique ; c'est l'état d'équilibre dans un réacteur nucléaire (réaction maîtrisée), qui ne doit pas être atteinte dans les installations nucléaires.
- Si  $k_{eff} > 1$  (Production > Absorption + Fuite), la configuration est sur-critique ; c'est l'état correspondant à un accident de criticité.

Ce bilan neutronique dépend à la fois des caractéristiques du milieu fissile (notamment la forme physico-chimique, de l'isotopie qui conditionnent les captures fissiles et fertiles) et de la géométrie dans laquelle se trouve ce milieu (qui conditionne la proportion de neutrons pouvant fuir).

Par exemple, pour l'uranium, les limites dépendent de la teneur en isotope 235. Ainsi, la masse minimale sous forme sphérique pouvant conduire à un accident de criticité (dans des conditions favorables pour la réaction) est de 0,87 kg pour de l'uranium très enrichi (à 93,5 % en <sup>235</sup>U), de 5,2 kg pour un enrichissement de 20 % et de 48 kg pour un enrichissement de 4 %.

## 2.2. Production des neutrons de fission

La production de neutrons de fission dépend de la quantité de noyaux fissiles présents dans le milieu fissile considéré, qui va directement influencer sur la probabilité totale de capture des neutrons par un noyau fissile. Ainsi, comme présenté au paragraphe précédent, il existe une masse en deçà de laquelle une réaction de fission auto-entretenu n'est physiquement plus possible. La criticité d'un milieu peut donc être contrôlée par la **limitation de la masse de matières fissiles**.

En pratique, ce mode de contrôle est applicable à l'échelle d'un appareil, d'une boîte à gants, d'une cellule, voire d'un laboratoire entier mettant en œuvre de faibles quantités de matières fissiles. Les limites de masse de matières fissiles associées à ce mode de contrôle considéré seul (c'est-à-dire non combiné avec un contrôle par la géométrie ou par la limitation de la modération par exemple, cf. paragraphes suivants) sont généralement incompatibles avec des installations à caractère industriel.

Le respect des limites de masse associées à ce mode de contrôle implique la mise en place de procédures imposant des contraintes strictes d'exploitation (comptabilité de la matière fissile, maîtrise des transferts de matière, maîtrise des accumulations) et présente l'inconvénient d'être vulnérable au « facteur humain ».

La plupart des noyaux fissiles ayant une section efficace de fission (équivalent à une probabilité de fission) d'autant plus importante que l'énergie des neutrons incidents est faible, tout processus conduisant à diminuer l'énergie des neutrons favorise les réactions de fission. Au moment de leur « naissance » à la suite d'une fission, les neutrons de fission ont une énergie de l'ordre de 2 millions d'électronvolts (2 MeV) et leur probabilité de capture par un noyau fissile pour donner une fission est relativement faible. Lors de leur déplacement dans la matière, les neutrons cèdent progressivement leur énergie au cours

de collisions avec les noyaux du milieu, ce qui augmente leur probabilité de capture et donc de provoquer des fissions. Ce processus de ralentissement des neutrons par diffusion, sans capture, lors des collisions successives sur les noyaux du milieu considéré s'appelle la thermalisation ou, dans le jargon technique, **la modération**.

L'énergie cédée par les neutrons au cours des chocs avec les noyaux du milieu est d'autant plus grande que ces noyaux sont légers. L'un des « champions » des modérateurs est l'hydrogène dont le noyau est constitué par un seul proton, de même masse qu'un neutron. On comprend ainsi le rôle particulier joué par l'eau dans la prévention des risques de criticité, dont la molécule comporte notamment deux atomes d'hydrogène.

A titre d'illustration, en présence d'eau (donc d'hydrogène), la masse minimale pouvant conduire, dans les conditions les plus favorables pour la réaction, à un « keff » égal à 1 est d'environ 0,5 kg pour le plutonium 239, alors qu'elle est de 4,5 kg en l'absence d'eau. Pour certains milieux fissiles, tel que l'uranium enrichi à moins de 6,6 % en isotope 235 sous forme oxyde, le seul fait de maintenir le milieu rigoureusement exempt de matière hydrogénée (ou tout autre matériau modérateur) suffit à exclure tout risque de criticité, même en présence de grandes quantités de matière.

La criticité d'un milieu peut donc être contrôlée par la limitation de la modération (c'est-à-dire principalement par la limitation de la quantité d'hydrogène).

Il est à noter que d'autres atomes « légers », tels que le carbone et le béryllium, peuvent également assurer une modération significative des neutrons. Toutefois, ils sont moins répandus dans les milieux fissiles rencontrés dans les installations et les quantités nécessaires sont généralement plus importantes.

### 2.3.Fuite des neutrons

Certains neutrons, au cours de leurs déplacements dans la matière, peuvent s'échapper du milieu fissile qui leur a donné « naissance ». Ils ne participent plus, dans ce cas, à l'entretien des réactions en chaîne. Cette fuite des neutrons est favorisée par :

- une densité du milieu fissile faible et la présence dans le milieu de noyaux interagissant peu avec les neutrons (dans les deux cas, les neutrons peuvent parcourir des distances plus grandes sans collision) ;
- des distances moyennes, à parcourir par les neutrons pour parvenir jusqu'aux frontières délimitant le milieu fissile, faibles.

Le seul fait de maintenir la matière fissile dans des équipements de dimensions suffisamment petites dans au moins une direction peut suffire à écarter tout risque de criticité (équipements de faible diamètre, de faible épaisseur...).

La criticité est dans ce cas contrôlée par **la limitation de la géométrie des équipements**.

Ce mode de contrôle est retenu en priorité lorsque les contraintes sur les dimensions sont compatibles avec les procédés. Il est peu sensible au « facteur humain » mais nécessite d'être retenu dès la conception des appareils (dimensionnement aux séismes, à la corrosion, aux déformations accidentelles suite à la montée en pression ou en température...). Des dispositions doivent par ailleurs être prises lors des modifications ou changements d'équipement pour garantir la géométrie. Une surveillance particulière des liaisons possibles entre appareils de géométrie sûre et appareils de géométrie quelconque doit être mise en place.

Les neutrons ayant fui hors d'un milieu fissile continuent leur trajectoire dans les matériaux environnants et, suite aux collisions avec les noyaux les constituant, sont capturés ou renvoyés dans le milieu fissile de départ : **ce dernier phénomène est appelé**

la **réflexion des neutrons**. Les cloisons, les parois des équipements, mais aussi les personnes, constituent, dans les usines, des réflecteurs susceptibles de limiter les fuites de neutrons. Les analyses de sûreté doivent tenir compte de ce phénomène.

Enfin, lorsque plusieurs équipements renfermant des matières fissiles sont à proximité les uns des autres, un **dernier facteur, appelé interaction**, est susceptible d'intervenir. Une fraction des neutrons fuyant d'un équipement peut entrer dans un équipement voisin, contenant lui aussi de la matière fissile, et y provoquer des fissions. Ce couplage neutronique peut ainsi augmenter la réactivité (« keff ») du système étudié.

#### 2.4. Absorption des neutrons

La disparition de neutrons, à la suite de captures non fissiles, entraîne la baisse du « keff », ce qui est favorable au maintien de la sous-criticité d'un milieu fissile. Des isotopes, fréquemment rencontrés dans les milieux fissiles, peuvent conduire à des captures fertiles des neutrons et donc limiter le risque de criticité. Parmi les principaux, figurent les isotopes 238 de l'uranium et 240 du plutonium (en spectre thermique). Leur teneur dans la matière fissile, dans la mesure où elle peut être garantie, peut être prise en compte dans la détermination du **milieu fissile de référence** (cf. définition § 3).

En outre, parmi les éléments naturels, quatre sont particulièrement efficaces pour capturer les neutrons (captures stériles). Il s'agit du bore (isotope  $^{10}\text{B}$ ), du cadmium, du hafnium et du gadolinium (isotope  $^{155}\text{Gd}$ ). Ils sont couramment utilisés dans les équipements sous forme homogène (solubilisés dans les solutions fissiles) ou hétérogène (sous forme d'écran) pour leurs propriétés neutrophages de manière à assurer la prévention des risques de criticité.

Le contrôle de la criticité s'effectue alors par recours à « **l'empoisonnement** ».

En dehors de ces quatre matériaux très neutrophages, d'autres noyaux peuvent également conduire à des captures stériles. Il peut être utile d'en tenir compte dans la détermination du bilan neutronique. Parmi les éléments courants, se distinguent le chlore, l'azote, le fer... et l'hydrogène dans certaines circonstances. C'est ainsi que les solutions aqueuses contenant de faibles concentrations en matières fissiles (donc des quantités importantes d'hydrogène) sont sous-critiques, même en présence de très grands volumes, grâce à « l'empoisonnement » apporté par l'hydrogène de l'eau.

Le contrôle de la criticité est alors obtenu par la **limitation de la concentration** (en matières fissiles).

L'hydrogène a des propriétés de modérateur (pouvant conduire à une augmentation de la réactivité) et de neutrophage (conduisant à la diminuer). La probabilité de capture d'un neutron par un noyau augmentant avec la modération, la réactivité d'un milieu en fonction de la quantité d'hydrogène présente un maximum. Ce maximum est appelé **l'optimum de modération**.

Enfin, pour les opérations concernant des combustibles « usés » (ou irradiés), il est possible de tenir compte de l'absorption des neutrons par certains produits de fission dans la mesure où l'on peut garantir leur présence. Par exemple, les isotopes samarium 149, samarium 152, gadolinium 155, césium 133, néodyme 143, rhodium 103, molybdène 95, stables et non volatiles, contribuent de manière significative aux captures stériles et pourraient être utilisés pour la justification de la sous-criticité d'une configuration. Toutefois, la qualification des données de base associées à ces produits de fission et des méthodes d'estimation de biais de calcul intégrant ces derniers font encore l'objet de nombreux travaux de développement.

### 3. LA PREVENTION DES RISQUES DE CRITICITE (MODES DE CONTROLE DE LA CRITICITE ET MILIEUX FISSILES DE REFERENCE)

Les paragraphes précédents mettent en évidence les multiples moyens pouvant permettre de prévenir les risques de criticité. Il s'avère que le seul fait de limiter un ou plusieurs paramètres « opérationnels » peut suffire à maintenir un système contenant des matières fissiles dans un état sous-critique.

**Ces paramètres peuvent être la concentration en matières fissiles des solutions, les dimensions des appareils, la quantité de matières fissiles et celle de matériaux modérateurs. Il peut également être fait appel à des matériaux neutrophages (ou poisons neutroniques).**

Dans une analyse de sûreté, la première étape consiste, à partir du procédé, du type de matières mises en œuvre et des flux maximaux de matières envisagés, à sélectionner le ou les paramètres qui permettront d'assurer la sous-criticité dans une unité de travail (ou unité de criticité<sup>1</sup>). Cette étape se conclut par le choix d'un **mode de contrôle** de la criticité (géométrie, masse, modération, concentration, empoisonnement) et d'un ou de **milieux fissiles de référence**. En général, ce choix est en grande partie piloté par le procédé mis en œuvre, son dimensionnement (capacité), mais aussi par la nécessité de limiter les contraintes opérationnelles.

**Le milieu fissile de référence** est un milieu fissile enveloppe qui, comparé aux milieux fissiles susceptibles d'être rencontrés dans l'installation en fonctionnement (normal ou anormal), conduit aux limites les plus faibles compte tenu du mode de contrôle de la criticité retenu. Le milieu fissile de référence peut, pour un équipement donné, différer selon les scénarios analysés (notamment si ces scénarios conduisent à une modification de la forme physico-chimique de la matière fissile).

Le milieu fissile de référence et le mode de contrôle sont définis pour une unité de criticité (par exemple, boîte à gants, ensemble de boîtes à gants, cellule, conteneur de transport...).

En pratique, **pour déterminer les limites imposées aux paramètres associés au mode de contrôle de la criticité et au milieu fissile de référence, il est nécessaire de rechercher la combinaison des paramètres la plus défavorable eu égard aux scénarios retenus au regard des risques de criticité et d'en déduire les paramètres enveloppes pour la sûreté. Les paramètres non retenus au titre du mode de contrôle de la criticité peuvent prendre des valeurs quelconques.**

La définition d'un mode de contrôle, d'un milieu fissile de référence et d'une unité de criticité conduit ensuite, en toute logique, à la mise en place de moyens de contrôle adaptés pour garantir le respect des limites des paramètres de criticité associés au mode de contrôle (pesées pour le contrôle de la masse, analyses chimiques pour le contrôle de la concentration, mesures de l'acidité pour garantir l'absence de précipitation...).

### 4. ANALYSE DE LA SURETE-CRITICITE

L'analyse de sûreté retient non seulement les conditions de fonctionnement dites normales, mais aussi les dysfonctionnements envisageables. Dans ce cadre, la règle fondamentale de sûreté (RFS) n°1.3.c constitue la référence méthodologique au niveau français pour la prévention des risques de criticité, aussi bien pour les concepteurs que les exploitants d'installations.

<sup>1</sup> Une unité de criticité est toute ou partie d'une installation pour laquelle sont définies des limites globales destinées à prévenir les risques de criticité (mode de contrôle commun).

Cette RFS énonce comme principe général, dit « de double défaillance », qu'un « accident de criticité ne doit en aucun cas découler d'une seule anomalie : défaillance d'un composant, d'une fonction, erreur humaine (non-respect d'une consigne par exemple), situation accidentelle (incendie par exemple) »... et que « si un accident de criticité peut découler de l'apparition simultanée de deux anomalies, il sera alors démontré que :

- les deux anomalies sont rigoureusement indépendantes,
- la probabilité d'occurrence de chacune des deux anomalies est suffisamment faible,
- chaque anomalie est mise en évidence à l'aide de moyens de surveillance appropriés et fiables, dans un délai acceptable permettant l'intervention. »

Cette RFS préconise en outre de préciser, pour chaque unité de criticité (poste de travail...), le mode de contrôle de la criticité, le milieu fissile de référence et les dispositions relatives à chacun d'entre eux, en cohérence avec l'analyse des défaillances réalisée selon le principe de « double défaillance » précité.

Le texte de cette RFS est présenté en annexe 1.

Les synoptiques présentés en annexe 2, basés sur les principes définis dans la RFS :

- résumant la démarche d'analyse de la RFS n° I.3.c ;
- présentant pour le milieu fissile de référence et chaque mode de contrôle :
  - les paramètres associés,
  - les types de défaillance à analyser et, selon l'état de l'art actuel, les scénarios incidentels correspondants.

Ces graphes, développés par l'IRSN et susceptibles d'évoluer avec le retour d'expérience, constituent un guide d'analyse des risques de criticité, que ce soit pour la constitution de dossiers de sûreté ou pour l'expertise de ces derniers. Ils ont pour objectif de lister des questions standard que doit se poser le spécialiste en criticité, mais ne se prétendent pas exhaustifs.

## 5. MARGES DE SECURITE ET CRITERES DE DIMENSIONNEMENT

L'existence de marges de sécurité est essentielle pour garantir la sûreté des installations. Dans le cas des risques de criticité, l'analyse de sûreté devra donc définir les valeurs maximales admissibles pour chaque paramètre, l'état critique constituant une limite qui ne doit jamais être atteinte.

Il n'est pas possible de considérer, de façon simpliste, que cette marge de sécurité se traduit uniquement par une marge « administrative », prédéfinie, entre la valeur maximale du facteur de multiplication (« keff ») de la configuration étudiée et la valeur de 1 (correspondant à l'état critique). En effet, certains milieux fissiles voient leur « keff » varier très rapidement en fonction de certains paramètres. C'est le cas par exemple des milieux constitués de plutonium ou d'uranium très enrichi.

Pour cette raison, la RFS n'énonce pas, pour le « keff », de critère réglementaire chiffré de la marge de sécurité à respecter. L'appréciation des marges de sécurité d'une configuration ou d'une situation tient compte principalement de quatre critères : l'évaluation de la sensibilité de variation du « keff » en fonction des paramètres contrôlés, le degré de conservatisme lié à la modélisation de calcul (simplifications de géométrie, de composition, de réflecteur, de matériau modérateur), le caractère plus ou moins probable du scénario correspondant à la situation enveloppe retenue pour les situations

incidentelles ou accidentelles et enfin le degré de confiance dans les techniques de calcul utilisées (la RFS fait ici référence à une qualification sur une base expérimentale).

La qualification des schémas de calcul utilisés doit particulièrement être examinée lorsque la configuration traitée présente un « keff » relativement élevé. Celle-ci repose sur la comparaison de résultats de formulaires de calcul à des valeurs expérimentales. Les écarts obtenus sont ensuite interprétés afin de déterminer l'origine des biais observés (approximations, options de calculs, données nucléaires) puis de les transposer aux configurations réelles à étudier. Pour cela, il est nécessaire d'évaluer la représentativité des expériences sélectionnées par rapport à la configuration industrielle d'intérêt. Le biais ainsi déterminé est donc fortement dépendant de la représentativité des expériences sélectionnées et de la qualité de ces expériences, les valeurs expérimentales étant entachées d'une incertitude.

Les critères d'admissibilité et les valeurs des paramètres de criticité doivent alors être fixés à la lumière de l'état de la qualification de ces formulaires de calcul pour les configurations étudiées, en intégrant éventuellement des marges « forfaitaires » jugées suffisantes par l'expert.

## 6. LIMITER LES CONSEQUENCES D'UN ACCIDENT DE CRITICITE

Les dispositions de prévention des risques de criticité rendent très improbable une divergence incontrôlée dans une installation. Nonobstant, compte tenu des matières fissiles mises en œuvre, un accident de criticité reste physiquement possible (si plusieurs dispositions ne sont plus effectives).

Depuis 1945, il s'est produit une soixantaine d'accidents de criticité dans le monde. Une quarantaine de ces accidents est survenue dans des réacteurs de recherche ou dans des laboratoires sur des « assemblages critiques ». En outre, malgré des marges de sécurité par nature plus importantes, on recense actuellement vingt deux accidents survenus dans des installations du cycle du combustible. Ces accidents n'ont pas provoqué de rejets radioactifs significatifs dans l'environnement, mais des irradiations importantes entraînant, dans des délais courts, vingt décès dont dix dans des installations du cycle du combustible.

Une autre particularité des accidents de criticité est leur durée qui varie de quelques dixièmes de secondes à plusieurs dizaines d'heures. Dans certaines circonstances, des actions spécifiques ont dû être entreprises (injection de poison neutronique...) pour arrêter l'accident.

Aussi, selon les spécificités des installations, il est nécessaire de prévoir des dispositions complémentaires visant à limiter au maximum les conséquences d'un éventuel accident, notamment pour les personnels travaillant dans les installations et pour les personnes susceptibles de se trouver à proximité (public, personnel d'intervention...). Ces dispositions s'articulent autour de trois actions principales : la détection de l'accident, l'organisation de l'évacuation rapide des personnels concernés et, si nécessaire, l'intervention visant à arrêter l'accident.

## 7. RESEAU DE DETECTION ET D'ALARME DE CRITICITE

Eu égard à la cinétique, il n'existe pas de signe précurseur exploitable d'un accident de criticité ; les dispositifs de détection existants utilisent donc l'émission, au début de l'accident de criticité, d'un flux important de neutrons et de rayonnements gamma. Ces systèmes ne permettent donc pas d'éviter les conséquences, potentiellement létales pour les opérateurs situés à proximité, associées au début de l'accident.

En France, les systèmes de détection (EDAC, ensemble de détection et d'alarme de criticité) sont basés sur des groupes de détecteurs (ou sondes), mesurant les débits de dose totale (neutronique + gamma), et un coffret de traitement de ces mesures pilotant des alarmes sonores et lumineuses spécifiquement associées à l'accident de criticité. Le déclenchement de ces alarmes s'effectue dès que la dose totale et le débit de dose atteignent des seuils prédéterminés. Les détecteurs ont été conçus de façon à limiter au maximum le risque de fausse alarme et sont en outre susceptibles de fournir des informations sur l'accident (évolution dans le temps, évaluation de doses...) utiles pour la conduite de l'intervention.

## 8. EVACUATION

La limitation des conséquences radiologiques d'un accident de criticité dépend largement d'une évacuation rapide hors de la zone concernée. Le personnel doit donc avoir été entraîné à évacuer les lieux vers des points de rassemblement, selon des cheminements préalablement définis et fléchés. L'optimisation de l'implantation des détecteurs et des chemins d'évacuation résulte de l'étude de scénarios d'accidents propres à chaque installation.

## 9. INTERVENTION EN CAS D'ACCIDENT DE CRITICITE

L'expérience tirée des différents accidents de criticité, en particulier du dernier survenu en 1999 au Japon, montre qu'il peut être nécessaire d'intervenir pour arrêter un accident, en l'absence d'arrêt spontané suffisamment rapide. Cette intervention peut consister à « empoisonner » le milieu par l'ajout de solution ou de poudre contenant des matériaux neutrophages, à transférer le milieu fissile incriminé vers une géométrie qui garantit un état sous-critique, à éliminer un réflecteur neutronique (par vidange de l'eau du circuit de refroidissement dans le cas de l'accident de Tokai Mura)...

Au titre du retour d'expérience de cet accident, les autorités de sûreté françaises ont demandé aux exploitants d'installations concernées par les risques de criticité en milieu humide de réexaminer les moyens dont ils disposent pour détecter un accident et de préciser les moyens utilisables pour l'arrêter.

## 10. CONCLUSION : RIGUEUR, RESPECT DES PRINCIPES ET VIGILANCE

**La maîtrise des risques de criticité dans les installations nucléaires est obtenue en imposant des limitations strictes à certains paramètres de contrôle bien identifiés.** Ces limites sont définies grâce à l'étude exhaustive des conditions de criticité de tous les appareils susceptibles de contenir des matières fissiles en conditions normale et anormales (dégradées, incidentelles et accidentelles) de fonctionnement en tenant compte de leur environnement spécifique.

Les paramètres enveloppes de ces études de sûreté et les configurations étudiées doivent être déterminés dans le respect du « principe de double défaillance » énoncé dans la règle fondamentale de sûreté n°1.3.c.

**Les outils de calculs de la criticité ont atteint un niveau élevé de précision grâce aux progrès réalisés dans les modèles de traitement neutronique et la connaissance des données nucléaires de base.** Ils permettent en particulier de rechercher les meilleures conditions de sûreté, sans approximations excessives, pour la majorité des situations. Des développements et des travaux de qualification actuellement en cours visent à en améliorer encore la précision, par exemple pour les calculs concernant les combustibles



usés, afin de mieux évaluer les marges de sécurité et, dans le cas des exploitants et industriels, d'optimiser les contraintes de sûreté-criticité en termes techniques et économiques.

Toutefois, l'un des impératifs des modélisations très détaillées est la nécessité de justifier plus finement la qualification des schémas de calcul. Cette justification est souvent confrontée au manque d'expériences de criticité adaptées à l'application envisagée. Les programmes de recherche développés par l'IRSN vont dans le sens d'une meilleure qualification des outils de calculs disponibles.

**En tout état de cause, les résultats des calculs de criticité doivent venir en appui des expertises de criticité et doivent toujours être pris avec suffisamment de recul et de vigilance.**

Enfin, quels que soient les efforts consentis lors de la conception des installations, il ne faut pas oublier que la prévention des risques de criticité est assurée par des hommes !

Les défaillances de la « chaîne humaine » relevées lors des accidents de criticité survenus dans le monde montrent, à cet égard, **toute l'importance de la formation et de l'organisation dans la maîtrise des risques de criticité et l'importance de la vigilance de tous les acteurs, c'est-à-dire de la bonne culture de sûreté.**

**Règle fondamentale de sûreté N° I.3.c**  
(18 octobre 1984)

Tome I : Conception générale et principes généraux applicables à l'ensemble de l'installation ; Chapitre 3 : Règles applicables à la prévention des risques dus aux rayonnements ionisants ; c) Risques de criticité.

Domaine d'application : Installations nucléaires de base autres que les réacteurs nucléaires.

La sûreté-criticité repose sur la mise en œuvre systématique et rationnelle de techniques de prévention organisées selon le principe de "défense en profondeur". Il doit être en particulier exclu qu'un risque de criticité puisse résulter d'une défaillance unique. L'ensemble des recommandations réglementaires de caractère général, applicables à la prévention des risques de criticité dans les laboratoires et usines autres que les réacteurs nucléaires a fait l'objet de la publication d'une règle fondamentale de sûreté dont le texte est reproduit ci-après.

### **I - Objet de la règle**

La présente règle a pour objet de préciser les dispositions prises pour éviter le risque d'accident de criticité dans les installations nucléaires de base autres que les réacteurs nucléaires, où est mise en œuvre de la matière fissile. Parmi ces installations, peuvent être cités les usines d'enrichissement de l'uranium, les ateliers de fabrication d'éléments combustibles, les usines de traitement des combustibles irradiés, les magasins de stockage.... Sont exclues des dispositions prévues par la présente règle, les installations ou parties d'installations où n'est mis en œuvre que de l'uranium dont la teneur en isotope 235 est inférieure ou égale à 1 p.100, dès lors que cet uranium n'est pas sous forme de réseaux de barreaux disposés dans du graphite ou dans de l'eau ordinaire ou enrichie en eau lourde. Sont également exclues, les installations ou parties d'installations où ne sont traités que des éléments combustibles constitués à partir d'uranium dont la teneur en isotope 235 est inférieure ou égale à 1 p. 100, dès lors que ces éléments n'ont pas été irradiés dans des réacteurs à neutrons rapides ou qu'ils ne subissent pas de traitement chimique pouvant conduire à une variation des proportions des isotopes fissiles en présence.

Nota : Les définitions des termes utilisés dans cette règle fondamentale de sûreté sont données dans le glossaire joint en annexe 1.

### **II - Dispositions générales destinées à la prévention du risque de criticité**

#### **II.1 - Définition des modes de contrôle**

Pour chaque unité fonctionnelle de l'installation, un mode de contrôle approprié en matière de sûreté-criticité sera retenu. Ce mode de contrôle sera défini par une limite supérieure imposée à l'un ou plusieurs des paramètres suivants :

- masse de matières fissiles,
- dimensions géométriques de l'appareillage,
- concentration en matières fissiles pour les solutions,
- rapport de modération pour les produits secs ou peu humides,

compte tenu de la présence éventuelle de poisons neutroniques.

Ces limites seront fixées pour un milieu fissile de référence, en tenant compte de l'environnement réflecteur et des interactions. Le milieu fissile de référence est celui qui, parmi tous ceux qui peuvent être rencontrés dans l'ensemble concerné, dans les conditions normales et anormales de fonctionnement, conduit aux limites les plus faibles en raison de sa teneur en matière fissile, de sa composition et de sa loi de dilution.

## II.2 - Principes généraux

Les principes suivants seront appliqués tant dans la conception que dans l'exploitation des installations :

- un accident de criticité ne doit en aucun cas découler d'une seule anomalie : défaillance d'un composant, d'une fonction, erreur humaine (non respect d'une consigne par exemple), situation accidentelle (incendie par exemple)...,
- si un accident de criticité peut découler de l'apparition simultanée de deux anomalies, il sera alors démontré que :
  - les deux anomalies sont rigoureusement indépendantes,
  - la probabilité d'occurrence de chacune des deux anomalies est suffisamment faible,
  - chaque anomalie est mise en évidence à l'aide de moyens de surveillance appropriés et fiables, dans un délai acceptable permettant l'intervention.

## II.3 - Dispositions relatives aux différents modes de contrôle

### II.3.1 - Contrôle par la masse de matière fissile

Lorsque ce mode de contrôle est adopté, une masse sûre de matière fissile est fixée par unité de travail. S'il est reconnu que la masse critique peut être atteinte à la suite d'une seule anomalie, conformément au principe énoncé au paragraphe 2.2., la masse sûre de matière fissile dans l'unité de travail considérée sera égale à la moitié au plus de la masse minimale critique pour le milieu fissile de référence. Cette limite sera éventuellement abaissée pour tenir compte de l'interaction neutronique éventuelle avec les masses de matière fissile présentes dans les unités de travail voisines.

Une évaluation de la masse totale de matière fissile présente dans l'unité de travail sera faite dans le but de vérifier que cette masse est à tout instant inférieure ou égale à la limite fixée.

Pour éviter une accumulation excessive de matière fissile, des examens réguliers de l'unité de travail, et, si nécessaire, des nettoyages seront effectués.

### II.3.2 - Contrôle par la géométrie des appareils

Ce type de contrôle est principalement utilisé dans les installations ou parties d'installations où la matière fissile se trouve sous forme de solutions concentrées.

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...);
- fuites ou débordements de solutions de matière fissile 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 solution de matière fissile susceptible de se répandre, et équipées de détecteurs de présence de liquide et de moyens de reprise ;

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

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 les principes généraux exposés au paragraphe 2.2., sont satisfaits 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 en matière fissile de la solution contenue dans l'appareil de géométrie sûre.

### II.3.3 - Contrôle par la concentration en matière fissile des solutions

Ce type de contrôle est principalement utilisé dans les installations ou parties d'installations dans lesquelles les concentrations en matière fissile des solutions sont sûres, compte tenu de la géométrie des appareils qui les contiennent. Il ne peut s'appliquer qu'à des solutions de matière fissile homogènes.

En conséquence, les dispositions appropriées seront prises pour éviter la précipitation, la polymérisation, la cristallisation, l'extraction dans un autre fluide (solvant par exemple) ainsi que l'élévation de la concentration de la matière fissile par évaporation.

### II.3.4 - Contrôle par la modération

Ce mode de contrôle est généralement utilisé, associé au contrôle par la masse, dans les installations ou parties d'installations de fabrication d'éléments combustibles.

Il est réservé généralement aux produits secs ou peu humides, non hygroscopiques. 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.

#### II.3.5 - Empoisonnement neutronique

L'empoisonnement neutronique est utilisé lorsque le procédé nécessite l'utilisation d'appareils de grand volume, non réalisables en géométrie sûre, ou lorsqu'il est nécessaire d'isoler neutroniquement des appareils entre eux.

La présence en quantité suffisante de poison neutronique sera garantie. Dans le cas d'un empoisonnement homogène, elle fera l'objet de deux estimations par des méthodes différentes et, si nécessaire, des dispositions seront prises pour éviter la dilution ou la précipitation du poison. Dans le cas d'un empoisonnement hétérogène, la pérennité de l'élément neutrophage et, lorsqu'il existe, du matériau modérateur associé, sera garantie à l'égard des risques d'incendie.

#### II.4 - Critères de dimensionnement

Une étude aussi complète que possible des conditions de fonctionnement normal et anormal permet de choisir, pour les diverses parties de l'installation, un mode de contrôle. Les hypothèses de calcul les plus pessimistes du point de vue du risque de criticité seront retenues pour dimensionner l'installation.

Le dimensionnement des appareils, les valeurs des masses de matière fissile et de concentration en poison neutronique sont définis de telle sorte que les coefficients de multiplication effectifs (keff) soient inférieurs à 1 avec une marge de sécurité suffisante. Cette marge peut-être modulée selon le degré de confiance accordé aux techniques de calculs, fonction de la qualification de ces techniques par comparaison aux résultats d'expériences portant sur des configurations proches de celles étudiées.

#### II.5 - Procédures de modification

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.

### III - Formation du personnel

Compte tenu de l'importance du facteur humain dans la prévention du risque de criticité, le personnel appelé à travailler dans les installations présentant un tel risque, recevra une formation en la matière (dispensée par un ingénieur criticien).

### IV - Dispositions complémentaires destinées à la prévention des conséquences d'un accident de criticité

Compte tenu des conséquences éventuelles d'un accident de criticité sur le personnel et la population, il pourra être nécessaire de compléter les dispositions de prévention, par l'installation d'un réseau de détection, d'alarme et de mesure d'accident de criticité.

## GLOSSAIRE

### I - Concentration critique

Concentration en matière fissile de composition isotopique donnée, pour laquelle un milieu fissile homogène de forme géométrique donnée est juste critique.

I.1 - Concentration critique limite : concentration en matière fissile de composition isotopique donnée, pour laquelle un milieu homogène de dimensions infinies est juste critique.

I.2 - Concentration sûre : concentration en matière fissile de composition isotopique donnée, au-dessous de laquelle le milieu fissile est garanti sous-critique avec une marge de sécurité appropriée.

### II - Empoisonnement neutronique

Diminution de la réactivité d'un milieu fissile par la présence de nucléides absorbant les neutrons (poisons neutroniques). L'empoisonnement neutronique homogène est assuré par la présence d'un poison neutronique dissous dans une solution de matière fissile, l'empoisonnement hétérogène est assuré par la présence, dans un récipient recevant des solutions de matière fissile, de structures constituées de matériaux contenant des poisons neutroniques (anneaux de raschig en verre au borosilicate, plaques d'acier boré...).

### III - Facteur de multiplication effectif (keff ou « réactivité »)

Rapport du nombre total de neutrons produits dans un milieu fissile donné au cours d'un intervalle de temps, au nombre total de neutrons perdus par absorption et par fuite au cours du même intervalle de temps toutes choses égales par ailleurs (ne sont pas considérés dans ce rapport les neutrons produits par des sources dont les intensités ne sont pas fonction du processus de réaction en chaîne).

### IV - Forme géométrique critique

Forme géométrique d'un milieu fissile dont les dimensions sont telles qu'il est critique pour une composition ou une répartition déterminée de matière fissile, compte tenu de l'environnement réflecteur.

IV.1 - Forme géométrique minimale critique : forme géométrique d'un milieu fissile de dimensions au-dessous desquelles il est sous-critique quelles que soient la masse et la modération de la matière fissile.

IV.2 - Forme géométrique sûre : forme géométrique d'un milieu fissile garanti sous-critique avec une marge de sécurité appropriée, quelles que soient la masse et la modération de la matière fissile.

**Nota** : le mot « géométrie » est usuellement utilisé à la place de l'expression « forme géométrique ».

### V - Loi de dilution

Relation entre la concentration en matière fissile d'un milieu et le rapport de modération.

### VI - Masse critique

Masse de matière fissile qui peut-être rendue critique pour une forme géométrique et une composition déterminées de cette matière, compte tenu de l'environnement réflecteur.

VI.1 - Masse minimale critique : masse de matière fissile au-dessous de laquelle le milieu fissile est sous-critique quelles que soient sa forme géométrique et sa modération.

VI.2 - Masse sûre : masse de matière fissile au-dessous de laquelle le milieu est garanti sous-critique avec une marge de sécurité appropriée quelles que soient sa forme géométrique et sa modération.

### VII - Matière fissile

Matière constituée d'éléments chimiques dont certains isotopes sont fissiles, tels que :  $^{233}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ .

### VIII - Milieu fissile

Milieu physico-chimique contenant, entres autres, de la matière fissile.

### IX - Modérateur

Matériaux dont les noyaux (noyaux modérateurs) réduisent l'énergie cinétique des neutrons qui les rencontrent. Ce ralentissement des neutrons est obtenu par chocs élastiques ou inélastiques sur ces noyaux.

### X - Rapport de modération

Rapport du nombre de noyaux de modérateur au nombre de noyaux fissiles contenus dans un volume donné de milieu fissile.

### XI - Sûreté-criticité

Ensemble des dispositions prévues pour prévenir le risque de criticité.

### XII - Unité de travail

Partie de l'installation dont le contour est matérialisé et à l'intérieur de laquelle se trouve une masse limitée de matière fissile.

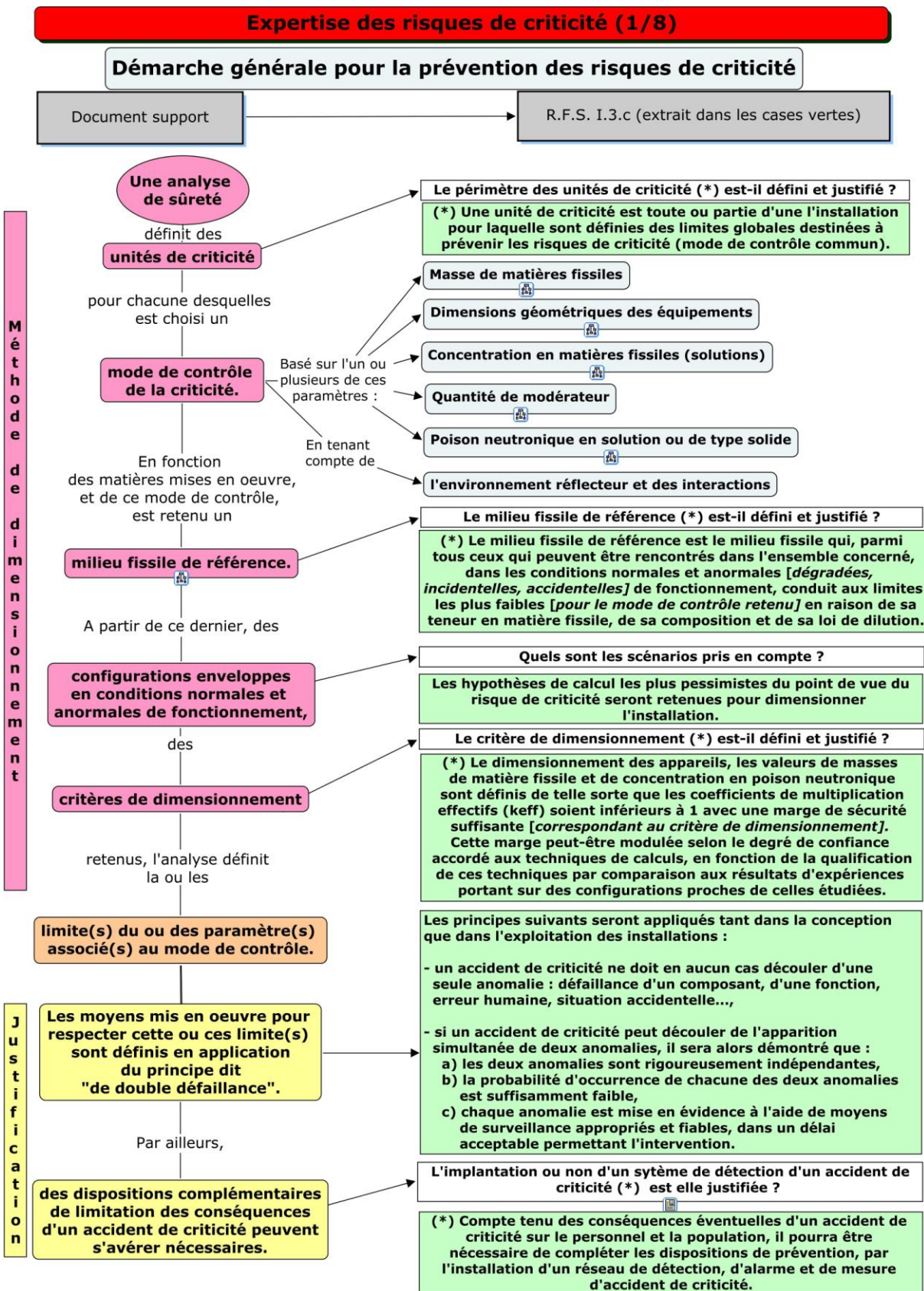
### Synoptique d'analyse des risques de criticité

Les diagrammes présentés dans cette annexe résument, d'une part la méthodologie préconisée par la RFS N° I.3.c (premier diagramme), d'autre part, pour le milieu fissile de référence et chaque mode de contrôle de la criticité, les paramètres devant être pris en compte, les défaillances à étudier et les scénarios types associés à ces défaillances.

L'objectif de ces diagrammes est d'être un support, le plus exhaustif possible, à l'établissement ou l'expertise d'une analyse des risques de criticité. Ils visent à identifier les points devant être analysés, mais ne préconisent pas de solutions techniques. En effet, ces solutions doivent être le plus possible adaptées à la situation traitée. Ainsi pour chaque scénario identifié, le but de l'analyse est, soit d'exclure ce scénario, soit de démontrer qu'il conduirait à une configuration admissible.

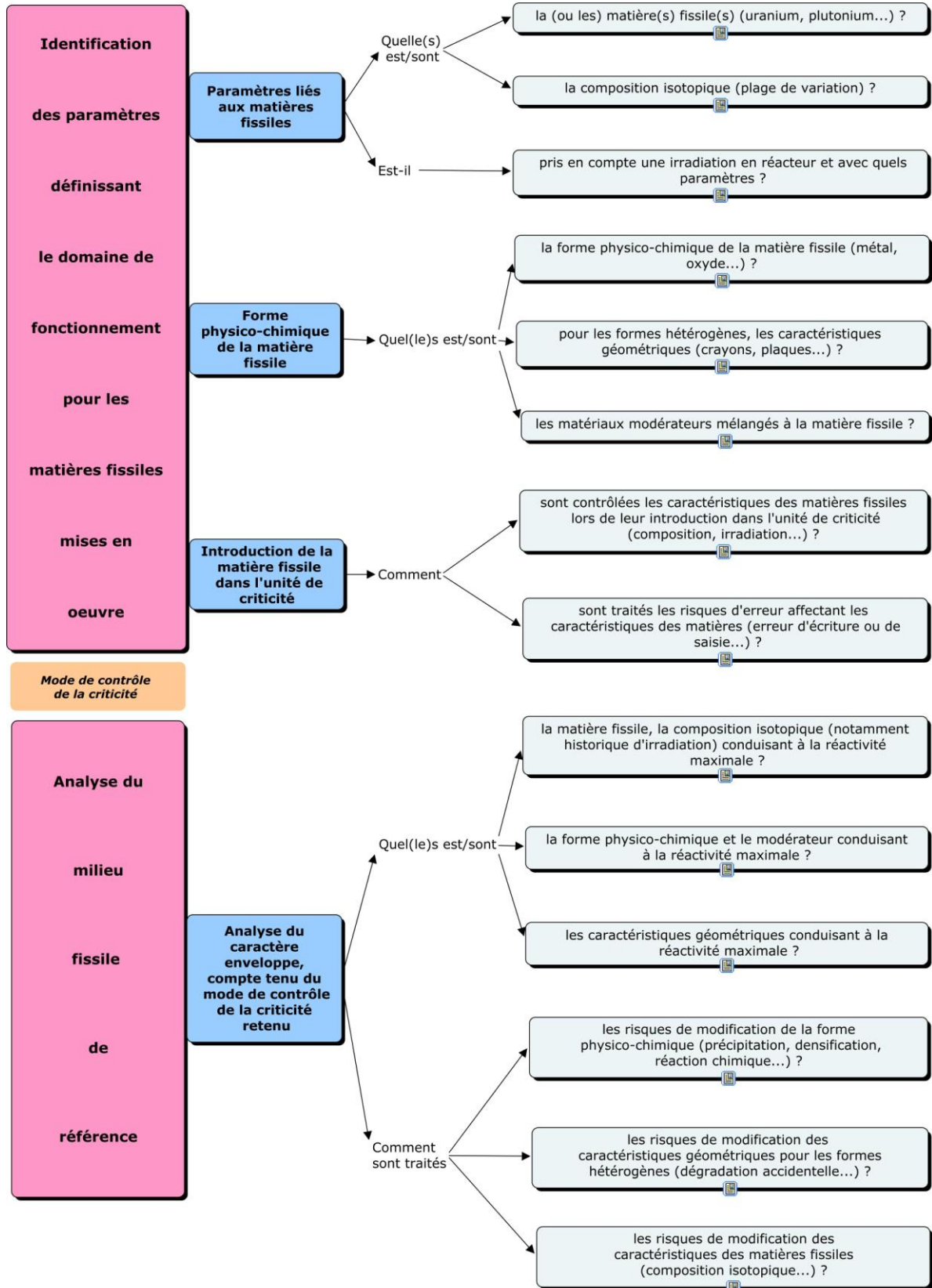
Enfin, ces diagrammes pourront évoluer avec le retour d'expérience acquis dans la conception et l'exploitation des installations nucléaires.





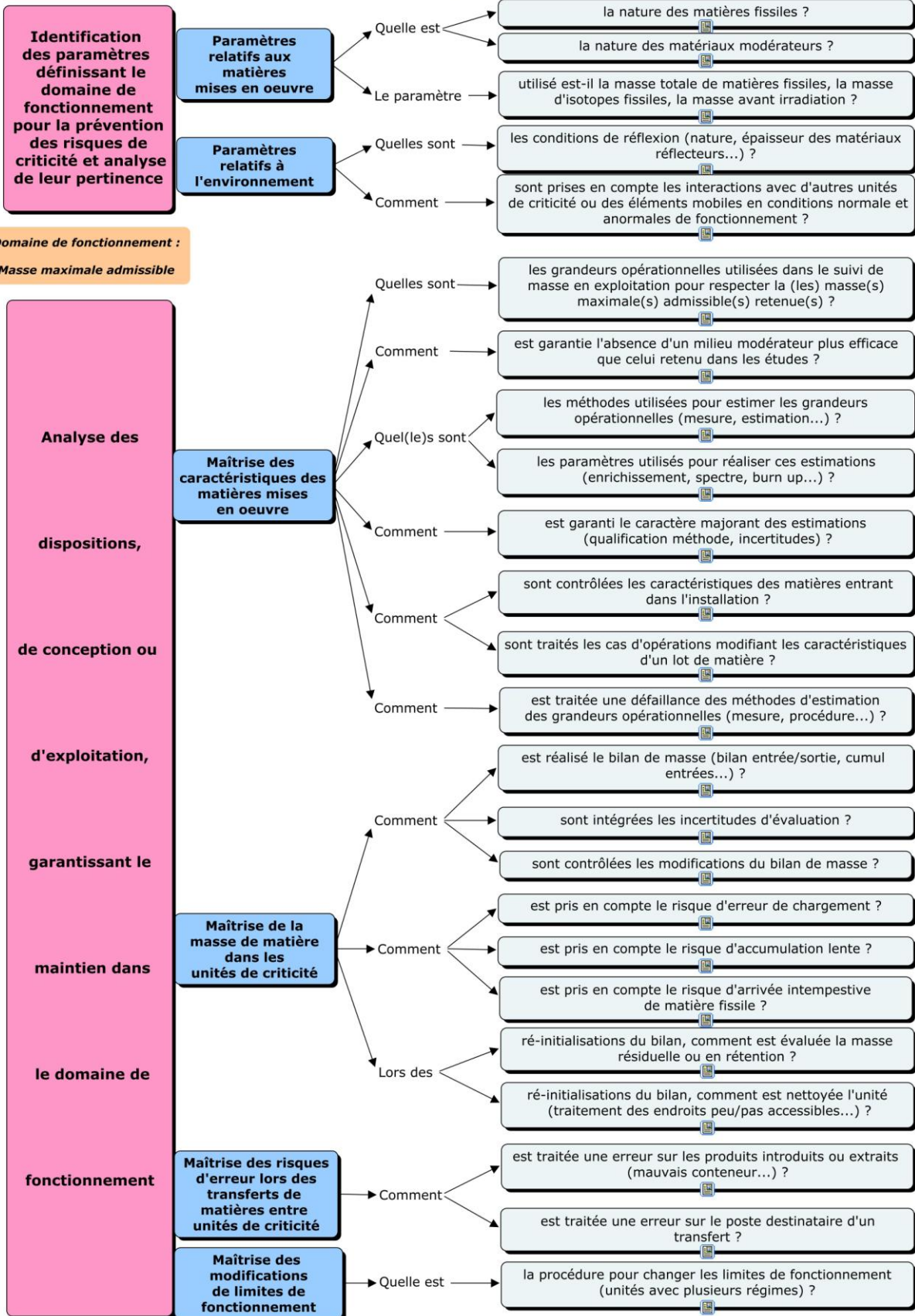
## Expertise des risques de criticité (2/8)

### Milieu Fissile de Référence



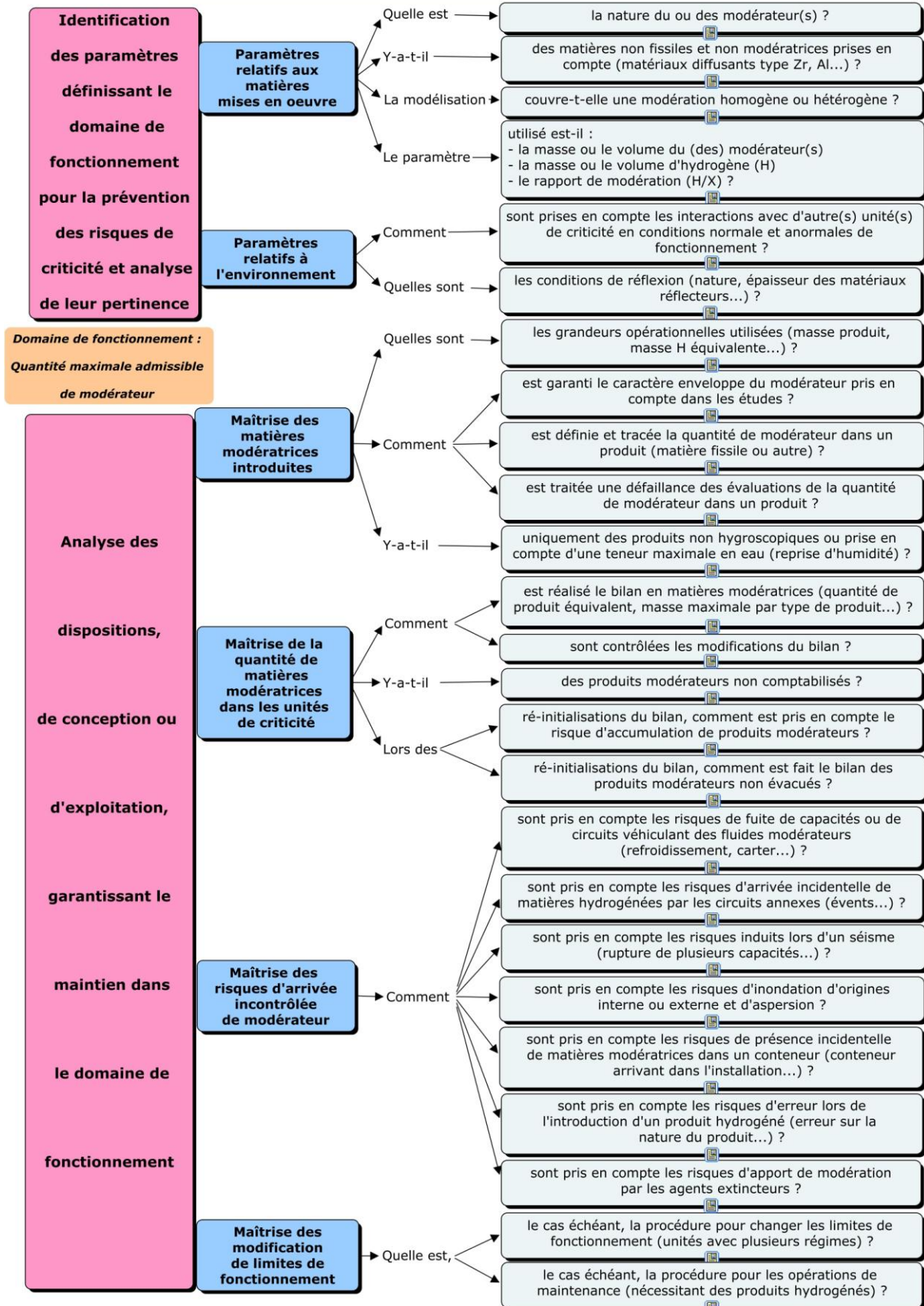
**Expertise des risques de criticité (3/8)**

**Mode de contrôle incluant une limitation de la masse de matières fissiles**



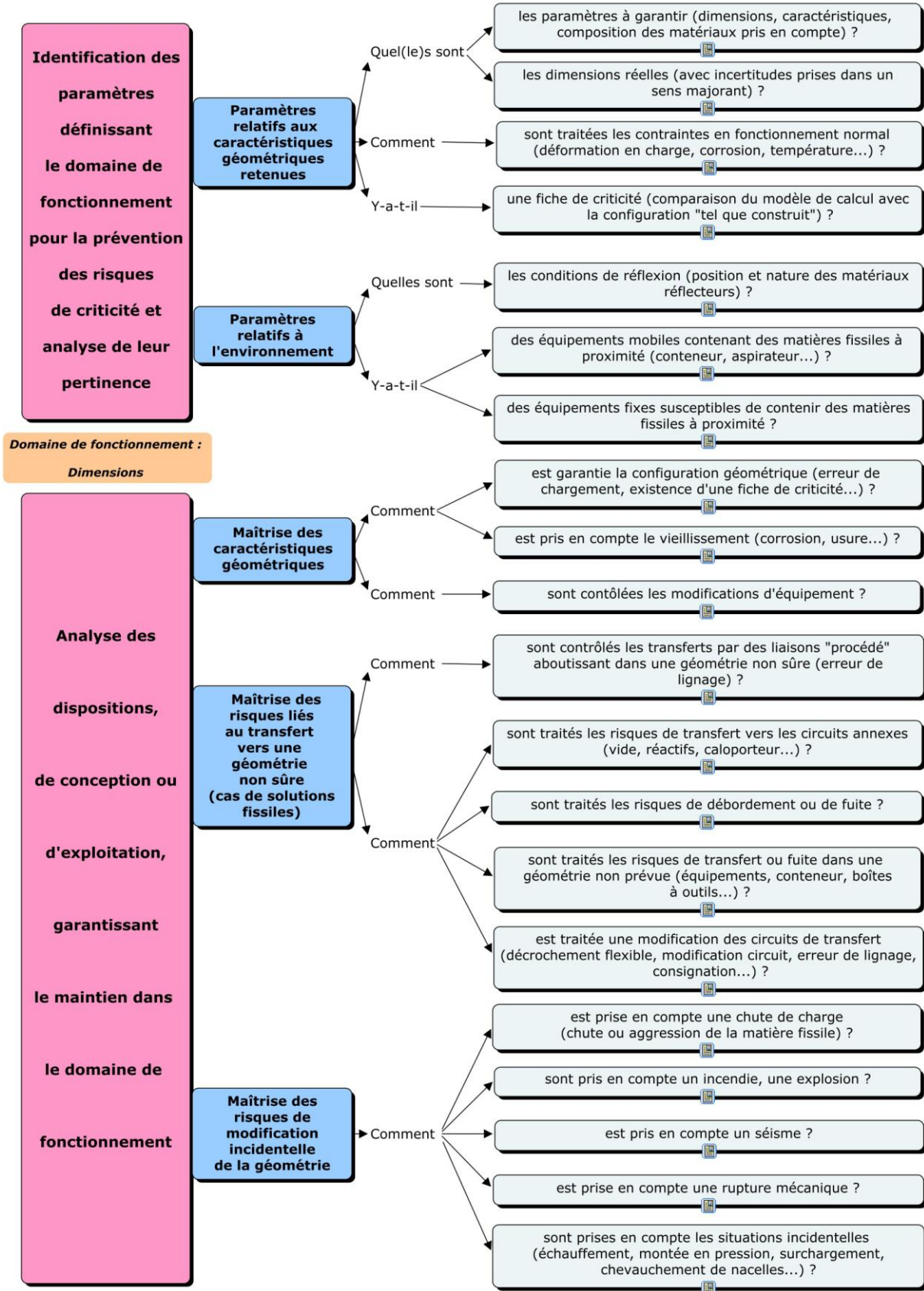
## Expertise des risques de criticité (4/8)

### Mode de contrôle incluant une limitation de la modération



**Expertise des risques de criticité (5/8)**

**Mode de contrôle incluant une limitation de la géométrie**



## Expertise des risques de criticité (6/8)

### Mode de contrôle incluant une limitation de la concentration C(X) ou du rapport H/X

Identification des paramètres définissant le domaine de fonctionnement pour la prévention des risques de criticité et analyse de leur pertinence

Paramètres relatifs aux matières mises en oeuvre

Quelle est

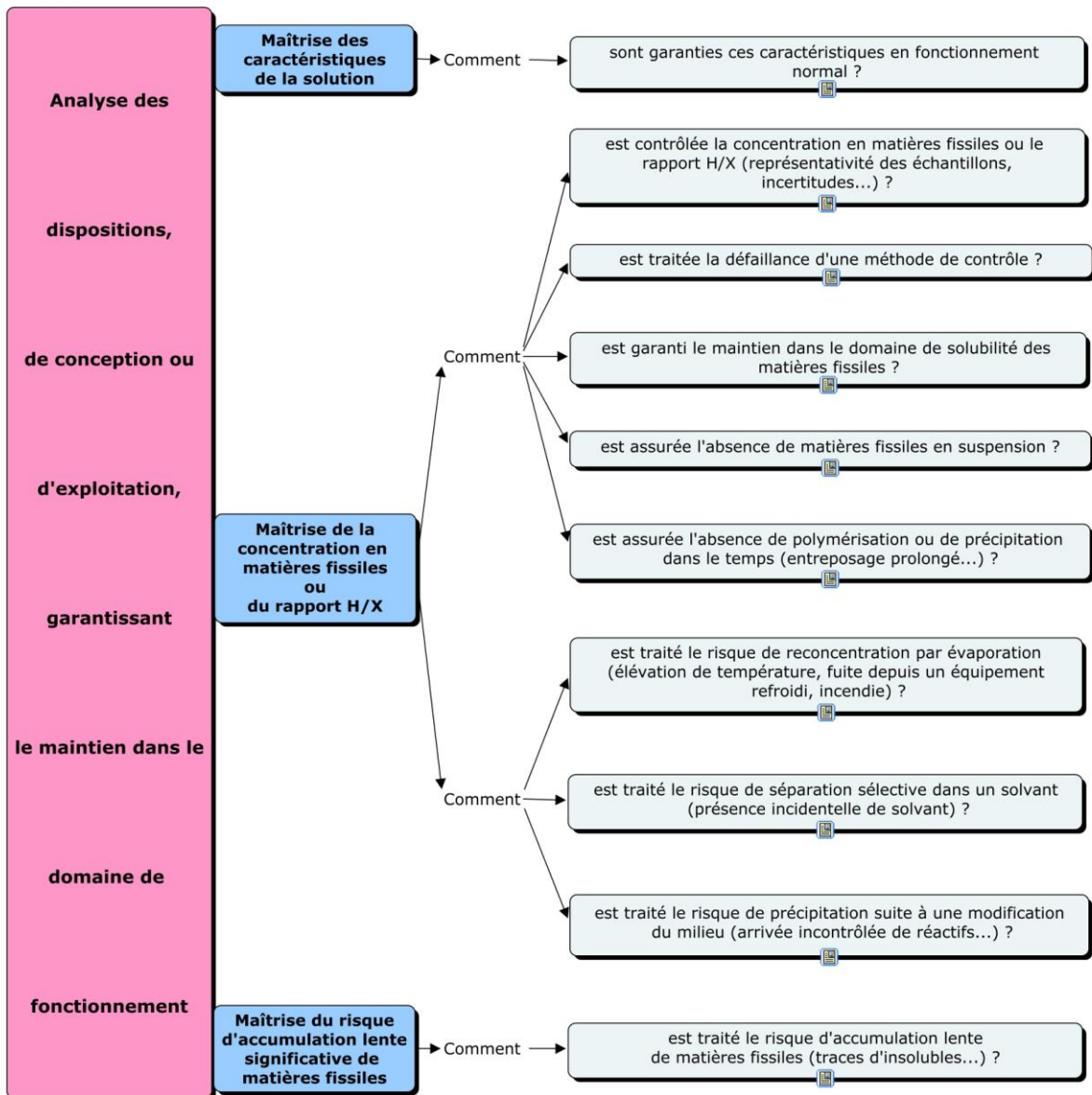
la nature physico-chimique des matières fissiles ?

la solution prise en compte (aqueuse, nitrique, organique...) ?

Domaine de fonctionnement :

Concentration maximale admissible C(X)

ou rapport H/X minimal admissible



## Expertise des risques de criticité (7/8)

### Mode de contrôle incluant un empoisonnement homogène en solution ou homogène

**Identification des paramètres définissant le domaine de fonctionnement pour la prévention des risques de criticité et analyse de leur pertinence**

**Paramètres relatifs au poison mis en oeuvre**

Quel(le) est

la nature physico-chimique des matières fissiles ?

l'élément neutrophage pris en compte (sa composition) ?

**Domaine de fonctionnement :**  
Concentration minimale en poison

**Analyse des dispositions, de conception ou d'exploitation, garantissant le maintien dans le domaine de fonctionnement**

**Maîtrise de la concentration en poison**

Comment

est assurée la solubilité du poison dans les conditions d'utilisation ?

est contrôlée la concentration en poison ?

est traitée la défaillance d'une méthode de contrôle de la concentration ?

**Maîtrise du risque de "perte" du poison**

Comment

sont traités les risques de précipitation accidentelle du poison (arrivée de réactifs, modification des conditions d'utilisation modifiant la solubilité...)?

sont traités les risques de modifications de l'empoisonnement (adsorption, démixion de solution...)?

sont traités les risques de dilution du poison (arrivée de solutions ou de fluides non empoisonnés...)?

**Maîtrise du risque de séparation des matières fissiles du poison**

Comment

est traité le risque de décantation des matières fissiles (absence d'insoluble) ?

est traité le risque de séparation sélective dans un solvant (présence accidentelle de solvant) ?

est assurée l'absence de polymérisation ou de précipitation dans le temps (entreposage prolongé...)?

est traité le risque de précipitation suite à une arrivée accidentelle de réactifs (circuit procédé, événement...)?

est garanti le maintien dans le domaine de solubilité des matières fissiles ?

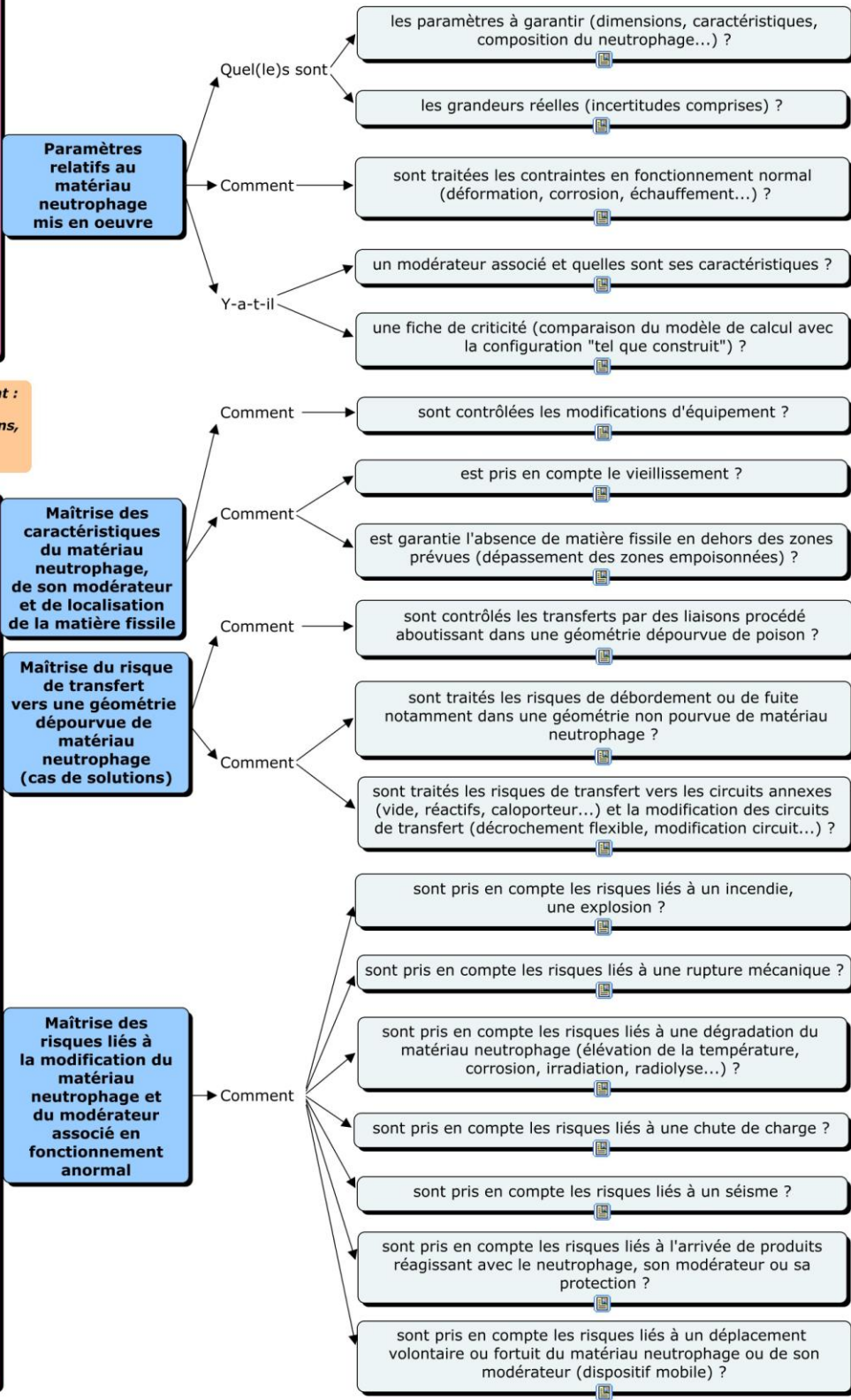
**Expertise des risques de criticité (8/8)**

**Mode de contrôle incluant un empoisonnement hétérogène**

**Identification des paramètres définissant le domaine de fonctionnement pour la prévention des risques de criticité et analyse de leur pertinence**

*Domaine de fonctionnement : Caractéristiques (dimensions, densité...)*

**Analyse des dispositions, de conception ou d'exploitation, garantissant le maintien dans le domaine de fonctionnement**





**GUIDE D'ANALYSE  
LES RISQUES DE CRITICITÉ ET LEUR PRÉVENTION DANS LES USINES, LES LABORATOIRES  
FICHE DE DEMANDE D'ÉVOLUTION**

**DEMANDEUR**

Demandeur :	Date :
Société :	Téléphone :
Service :	Télécopie :
Adresse :	Email :

**ELEMENT CONCERNE**

**TEXTE**

**GRAPHES**

N° paragraphe :	Titre :
N° page :	

**DESCRIPTION DE LA DEMANDE**

**A envoyer à Eric Létang - Chef du SEC**

Email : <mailto:eric.letang@irsn.fr>

BP 17- 92262 FONTENAY AUX ROSES CEDEX  
Télécopie 01 58 35 29 98

**ACCUSE DE RECEPTION**

DATE DE RECEPTION :