



RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

**IRSN**

INSTITUT DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

RAPPORT

# GUIDE D'ANALYSE

LA MAITRISE DU RISQUE DE CRITICITE DANS LES  
USINES, LES LABORATOIRES ET LES REACTEURS  
(HORS CŒURS CONSTITUES)

Pôle Sûreté Nucléaire

Rapport IRSN N° 2022-00749

## FICHE DESCRIPTIVE DESCRIPTION SHEET

<b>Title</b>	<b>Guide d'analyse</b>
<b>Subtitle</b>	<i>La maîtrise du risque de criticité dans les usines, les laboratoires et les réacteurs (hors cœurs constitués)</i>
<b>Auteur(s)/Author(s)</b>	Fabien DURET – fabien.duret@irsn.fr Et contributions de Ludvine JUTIER, Julien RANNOU, Céline LENEPVEU, Tristan ADATTE, Julien THEVENIN, Grégory CAPLIN, Lucile VIAULLE, Thomas ALBERT, Matthieu DULUC
<b>Élément d'imputation</b>	001/02/02/02

## HISTORIQUE DES MODIFICATIONS CHANGE HISTORY

Indice de révision <i>Revision</i>	Date	Rédacteur <i>Author</i>	Pages ou paragraphes modifiés <i>Pages or paragraphs changed</i>	Nature des modifications <i>Nature of the changes</i>
A	22/11/2022	F. DURET		

	Rédacteur(s) <i>Author(s)</i>	Vérificateur(s) <i>Reviewer(s)</i>	Approbation ( <i>approval</i> )		
			Chef de service <i>Head of department</i>	Chargé de mission <i>Program leader</i>	Directeur <i>Director</i>
Nom/ <i>Name</i>	F. DURET	M. DULUC	S. PIGNET	E. LETANG	I. LE BARS
Date	22/11/2022				
Visa					

**RÉSUMÉ**

Mots clés : criticité, maîtrise, guide, analyse

Ce rapport est un support à la réalisation ou à l'expertise d'une analyse de la prévention du risque de criticité et de la limitation des conséquences d'un accident de criticité. Il constitue une mise à jour du guide de 2010 écrit par l'IRSN (référence [1]), pour tenir compte des évolutions de la réglementation et de l'analyse des événements significatifs déclarés par les exploitants nucléaires en lien avec la sûreté-criticité. Après une introduction de ce risque, le rapport présente les différents grands thèmes abordés dans la décision ASN n°2014-DC-0462 et l'instruction DSND n°34 (prévention, organisation et formation, limitation des conséquences d'un accident), ainsi qu'une synthèse sur le thème de la mesure nucléaire. Ensuite, il présente, sous forme de diagrammes, d'abord la méthode préconisée par la décision et l'instruction précitées, puis, 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. Des diagrammes analogues sont ensuite présentés pour le cas des cœurs « non constitués » des réacteurs (milieux fissiles et moyens de maintien de la sous-criticité). Enfin, d'autres diagrammes concernant les paramètres relatifs aux réflexions et aux interactions neutroniques, à la mesure nucléaire et à la limitation des conséquences dosimétriques d'un accident de criticité (sièges potentiels, détection et alarme, gestion et protection) complètent le contenu de ce rapport.

**SUMMARY**

Key-words : criticality, control, guide, analysis

This report is a support to the realization or the assessment of an analysis of the prevention of criticality risk and the limitation of consequences of a criticality accident. It updates the 2010 guide written by IRSN (reference [1]), to take into account changes in regulations and the analysis of criticality safety events reported by nuclear operators. After an introduction to this risk, the report presents the various major topics addressed in ASN Decision No. 2014-DC-0462 and DSND Instruction N° 34 (prevention, organization and training, limitation of the consequences of a criticality accident), as well as a summary on the topic of nuclear measurement. Then, it presents, with diagrams, firstly the method recommended by the above-mentioned decision and instruction, then, for the reference fissile medium and each criticality safety control mode, the parameters to be taken into account in the analysis, the failures to be studied and the typical scenarios associated with these failures, without claiming to be exhaustive. Similar diagrams are then presented for the case of reactor cores not fully loaded (fissile media and means of maintaining subcriticality). Finally, other diagrams concerning the parameters relating to neutron reflections and interactions, nuclear measurement and the limitation of dosimetric consequences of a criticality accident (potential locations, detection and alarm, management and protection) complete the content of this report.

# TABLE DES MATIÈRES

<b>1. PREAMBULE .....</b>	<b>5</b>
<b>2. INTRODUCTION .....</b>	<b>5</b>
<b>3. LE RISQUE DE CRITICITE .....</b>	<b>7</b>
3.1. Généralités .....	7
3.2. Bilan neutronique .....	9
3.3. Production des neutrons .....	10
3.4. Fuite des neutrons .....	11
3.5. Capture "non fissile" des neutrons .....	12
<b>4. PREVENTION DU RISQUE DE CRITICITE .....</b>	<b>13</b>
4.1. Unités de criticité, modes de contrôle de la criticité et milieux fissiles de référence ....	13
4.2. Analyse de la sûreté-criticité .....	14
4.3. Marges et critères de dimensionnement .....	15
<b>5. ORGANISATION ET FORMATION .....</b>	<b>16</b>
<b>6. LIMITATION DES CONSEQUENCES DOSIMETRIQUES D’UN ACCIDENT DE CRITICITE ...</b>	<b>17</b>
6.1. Détection de l’accident de criticité.....	18
6.2. Protection du personnel, des équipes de secours et de la population .....	18
6.3. Gestion de crise et moyens d’arrêt d’un accident de criticité .....	19
<b>7. MISE EN ŒUVRE D’UN SYSTEME DE MESURE NUCLEAIRE POUR GARANTIR LE RESPECT D’UNE LIMITE DE SURETE-CRITICITE .....</b>	<b>19</b>
<b>8. CONCLUSION : RIGUEUR, RESPECT DES PRINCIPES ET VIGILANCE .....</b>	<b>20</b>
<b>GLOSSAIRE.....</b>	<b>21</b>
<b>REFERENCES.....</b>	<b>23</b>
<b>ANNEXES .....</b>	<b>24</b>

## 1. PREAMBULE

Ce rapport constitue une mise à jour du guide cité en référence [1] pour tenir compte des évolutions de la réglementation et de l'analyse des événements significatifs déclarés par les exploitants nucléaires en lien avec la sûreté-criticité.

## 2. INTRODUCTION

Le cadre législatif et réglementaire des installations nucléaires de base (INB) est défini par la loi n° 2006-686 du 13 juin 2006 relative à la transparence et à la sécurité en matière nucléaire, dite « loi TSN » (dont les principales dispositions ont été codifiées dans le code de l'environnement). L'arrêté du 7 février 2012, dit « arrêté INB » [2] fixe les règles générales relatives aux INB en matière d'organisation et de responsabilité des exploitants d'INB, de démonstration de sûreté nucléaire, de maîtrise des nuisances et de leur impact sur la santé et l'environnement, de gestion des déchets et de préparation et gestion des situations d'urgence.

La « sûreté-criticité » est le domaine de la sûreté des installations nucléaires lié à la prévention du risque de criticité, principalement, et à la mitigation de l'accident de criticité, si un tel accident se produit malgré les dispositions prises pour la prévention.

L'autorité de sûreté nucléaire (ASN), en charge du contrôle de l'application de la loi, édicte des décisions. La décision n°2014-DC-0462 du 7 octobre 2014, relative à la maîtrise du risque de criticité dans les INB (dite « décision criticité ») [3], est applicable 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, des cœurs constitués des réacteurs<sup>1</sup> et des opérations de transport<sup>2</sup> (celles-ci répondant à des exigences réglementaires spécifiques qui ne sont pas abordées ici).

Pour l'application de « l'arrêté INB » et de la « décision criticité », un guide dual ASN-IRSN (guide n° 26) [4], en cours d'approbation lors de la rédaction du présent rapport, détaille et illustre les exigences en matière de maîtrise du risque de criticité dans les INB. Le guide dual ASN-IRSN se substitue à la Règle fondamentale de sûreté I.3.c du 18 octobre 1984.

S'agissant des installations nucléaires de base secrètes (INBS), l'arrêté du 26 septembre 2007 [5], dit « arrêté INBS », fixe la réglementation technique générale destinée à prévenir et limiter les nuisances et les risques externes résultant de leur exploitation. Son article 25 explicite le principe dit « de double éventualité ».

L'instruction DSND n° 34 [6], relative à la maîtrise du risque de criticité dans les installations et activités nucléaires intéressant la défense (IANID), constitue une transposition de la « décision criticité » de l'ASN. Ses articles 1 à 4 concernent l'ensemble des IANID et son article 5 concerne l'organisation dans les IANID ne relevant pas de l'autorité du ministère de la Défense. Les contenus de ces articles 1 à 5 sont très proches de ceux des articles de la « décision criticité ». En revanche, le contenu de l'article 6 de l'instruction DSND n° 34 diffère en partie de la philosophie de la « décision criticité ». Cet article 6 présente des points spécifiques aux IANID relevant de l'autorité du ministère de la Défense, notamment concernant l'organisation des exploitants.

Le présent guide d'analyse est applicable à l'ensemble des INB et des IANID dans le périmètre desquelles de la matière fissile est présente, à l'exception des cœurs constitués des réacteurs et des opérations de transport.

---

<sup>1</sup> Un cœur constitué est un cœur formé de la totalité de ses éléments combustibles et d'autres éléments (par exemple un dispositif expérimental) (cf. définition du glossaire).

<sup>2</sup> Contrairement aux configurations de transport elles-mêmes, les opérations de chargement et déchargement des emballages de transport relèvent néanmoins du présent guide.

Comme son titre l'indique, ce guide vise à identifier, de manière concrète, les points devant être analysés pour prévenir le risque de criticité et en limiter les conséquences en cas d'accident, en réponse à chacune des exigences figurant dans la réglementation (« décision criticité » de l'ASN et instruction DSND n° 34). Il est ainsi complémentaire du guide n° 26 [4].

Ce document présente dans un premier temps le risque de criticité, puis les différents grands thèmes abordés dans la « décision criticité » et l'instruction DSND n° 34 (principes de prévention, organisation et formation, limitation des conséquences dosimétriques d'un accident de criticité). Il aborde enfin le sujet de la mesure nucléaire pour ce qui concerne le respect de limites de sûreté-criticité.

Après cette phase de présentation du risque de criticité, sont introduits, sous forme de diagrammes, d'une part la méthode d'analyse préconisée par la « décision criticité » et l'instruction DSND n° 34, 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. Des diagrammes sont également présentés concernant les paramètres relatifs aux cœurs non constitués des réacteurs, aux réflexions et aux interactions neutroniques, aux mesures nucléaires et aux accidents de criticité (sièges potentiels, détection et alarme, gestion et protection).

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 du risque de criticité, que ce soit en support à la démonstration de sûreté-criticité présentée par les exploitants dans les dossiers de sûreté ou à l'expertise réalisée par l'IRSN de la maîtrise du risque de criticité d'une installation.

**Enfin, ce guide n'est que la synthèse des approches « classiques » et « incontournables » utilisées dans la maîtrise du risque de criticité. Si leur prise en compte apparaît comme 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 faut donc garder un esprit critique et interrogatif en déroulant ces approches. Il est bon de rappeler ici que tous les accidents de criticité recensés dans le monde 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)*

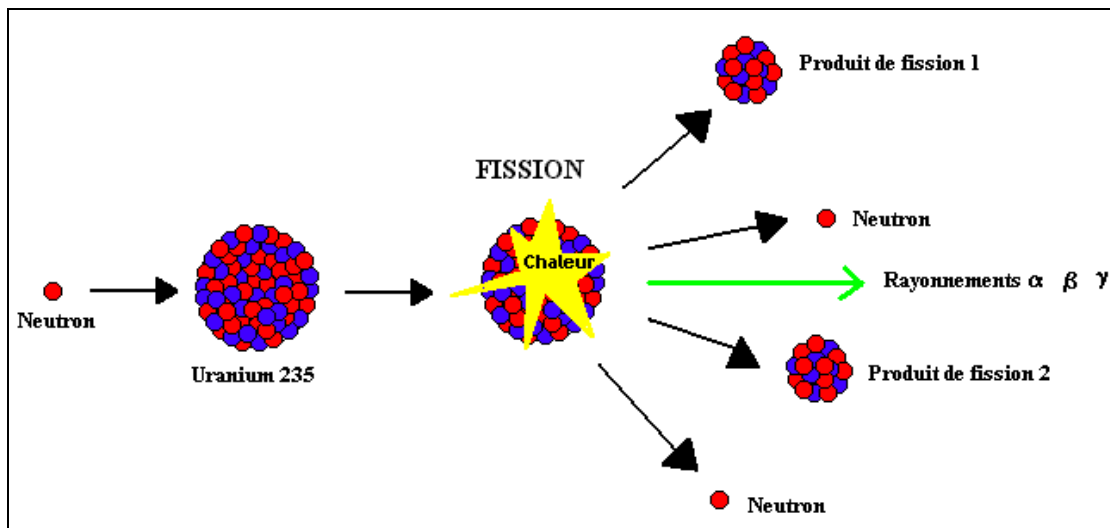
### 3. LE RISQUE DE CRITICITE

#### 3.1. Généralités

Certains isotopes, 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'isotope.

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

**Figure 1 : Réaction de fission induite par un neutron**



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, réacteurs hors cœurs constitués) 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. Il s'agit alors d'un accident de criticité, qui, en outre, entraîne la production de produits de fission, dont certains sous forme gazeuse. Ces produits de fission, ainsi que d'autres radionucléides initialement présents dans le système divergeant, peuvent être rejetés 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 surcritique) et, si nécessaire, d'en limiter les conséquences.

Le risque de criticité est considéré dans toutes les étapes du cycle du combustible mettant en œuvre du plutonium, de l'uranium dès lors que l'enrichissement en uranium 235 dépasse 1 %

<sup>3</sup> et/ou certains actinides mineurs (curium, américium, etc.) : usines d'enrichissement de l'uranium, usines de fabrication des combustibles à base de plutonium et/ou d'uranium, usines de traitement de combustibles irradiés, laboratoires d'études mettant en œuvre des matières fissiles, réacteurs hors cœurs constitués, installations de traitement d'effluents et de conditionnement de déchets, entreposages et transports de matières fissiles (combustibles, déchets radioactifs, etc.). Les configurations de transport sur la voie publique font l'objet d'une réglementation spécifique, non abordée dans le présent guide.

Il n'est pas nécessaire de disposer d'équipements complexes, 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 et dans une configuration géométrique sphérique. A contrario, un assemblage combustible EDF (REP 17 x 17) renferme plus de 400 kg d'uranium dans une configuration géométrique spécifique assurant la sous-criticité. Aussi, 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 d'atteinte de la criticité ne sont pas réunies.

L'analyse du risque de criticité a pour objectif de définir les dispositions de conception 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 du risque de criticité consiste d'abord à identifier 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'éventuels scénarios incidentels (erreur, défaillance d'un composant, etc.) ou accidentels (incendie, séisme, etc.), puis à évaluer les marges entre ces configurations et celles potentiellement critiques. C'est en maîtrisant ces configurations et en contrôlant strictement ces actions que la sûreté est assurée.

Ainsi, le risque de criticité est prévenu au moyen de dispositions 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 fissiles 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 capturant les neutrons appelés « poisons neutroniques ».

Outre la prévention du risque d'accident de criticité, l'analyse de sûreté-criticité porte aussi sur la limitation des conséquences d'un accident de criticité. Ainsi, 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). Des moyens d'arrêt de la réaction en chaîne et une stratégie d'intervention associée doivent également être prédéfinis afin de limiter les conséquences d'un accident de criticité si celui-ci dure dans le temps.

L'utilisateur du guide pourra, pour approfondir ses connaissances en matière de criticité, consulter par exemple les documents cités en références [7] à [9].

---

<sup>3</sup> Ce seuil d'1 % concerne l'uranium dès lors qu'il n'est pas sous forme de réseaux de barreaux disposés dans un milieu modérateur, tel que le graphite, l'eau ordinaire ou enrichie en eau lourde. En effet, les cœurs des réacteurs UNGG (Uranium Naturel Graphite Gaz) fonctionnent avec un enrichissement en uranium 235 inférieur à 1 %.



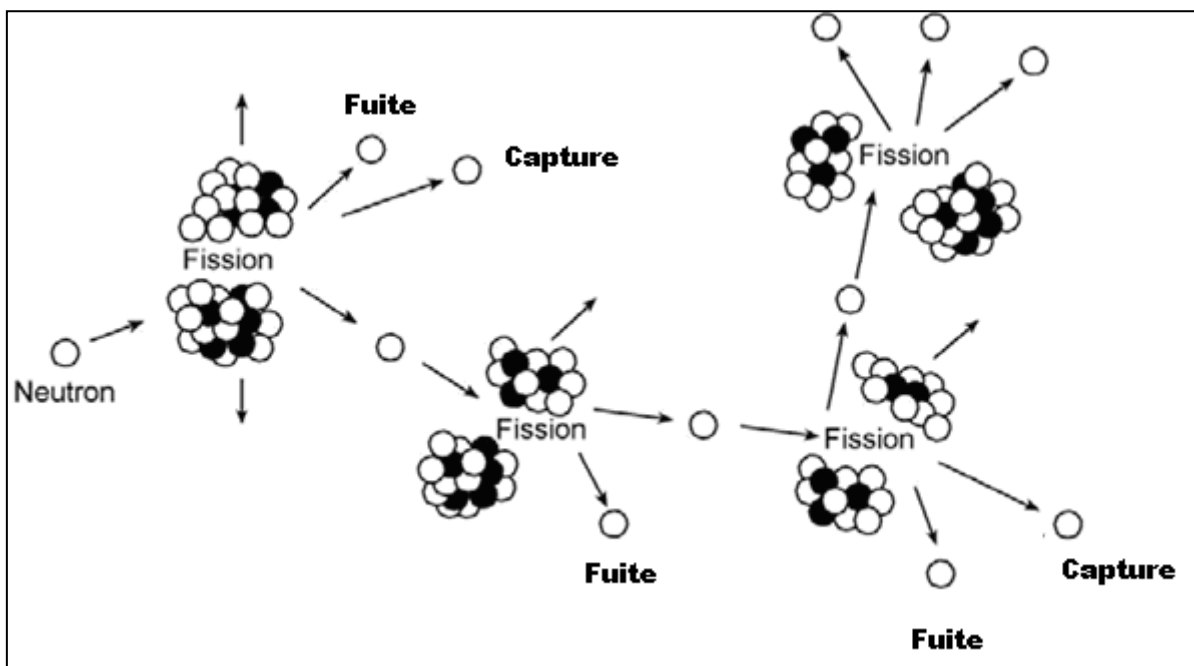
### 3.2. Bilan neutronique

L'une des étapes importantes dans l'analyse du risque 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'appuient, 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, etc.), provoquée par un neutron, libère plusieurs neutrons. 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 avec un noyau 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 (ceci 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 la 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 fuites. Ce bilan est exprimé par le facteur de multiplication effectif des neutrons (noté  $k_{\text{eff}}$ ), qui caractérise le facteur par lequel le nombre de fissions se trouve multiplié d'une génération de neutrons à la suivante. Cette grandeur, qui n'est pas accessible directement par la mesure, est déterminée à l'aide d'outils de calcul neutronique.

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

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  $k_{\text{eff}} < 1$  (Production < Absorption + Fuite), la configuration est sous-critique ; c'est l'état sûr recherché pour les installations nucléaires (hors réacteur en fonctionnement) ;
- Si  $k_{\text{eff}} = 1$  (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 autres types d'installations nucléaires ;
- Si  $k_{\text{eff}} > 1$  (Production > Absorption + Fuite), la configuration est surcritique ; 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 et l'isotopie qui conditionnent les captures fissiles et fertiles), de la géométrie et l'environnement dans laquelle se trouve ce milieu (qui conditionne la proportion de neutrons pouvant fuir).

Par exemple, pour l'uranium, les limites critiques dépendent essentiellement de la teneur en isotope 235. Ainsi, la masse minimale sous forme sphérique réfléchiée par de l'eau pouvant conduire à un accident de criticité (dans des conditions favorables pour la réaction de fission en chaîne) est de 0,87 kg pour de l'uranium très enrichi (à 93,5 % en uranium 235), de 5,2 kg pour un enrichissement de 20 % et de 5248 kg pour un enrichissement de 4 %.

### 3.3. Production des neutrons

La production des neutrons, par fission, dépend de la quantité de noyaux fissiles présents dans le milieu considéré, qui va directement influencer sur la probabilité totale d'absorption 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 prévention du risque de criticité peut donc reposer sur la **limitation de la masse de matières fissiles**. Cette dernière est l'un des modes de contrôle de la criticité (définis au § 3.1).

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 autre mode de contrôle tel que la géométrie ou 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 exigences strictes d'exploitation (comptabilité de la matière fissile, maîtrise des transferts de

matière, maîtrise des accumulations) et présente l'inconvénient d'être sensible aux « facteurs organisationnels et humains ».

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)<sup>4</sup> et leur probabilité d'absorption par un noyau fissile pour donner une fission est relativement faible. Lors de leur migration dans la matière, les neutrons cèdent progressivement leur énergie au cours de collisions avec les noyaux du milieu, ce qui augmente leur probabilité d'absorption et donc leur probabilité de provoquer des fissions. Ce processus de ralentissement des neutrons par diffusion, issu des collisions successives des neutrons 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 donc 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 du risque de criticité, dont la molécule comporte notamment deux atomes d'hydrogène.

À titre d'illustration, en présence d'eau (donc d'hydrogène), la masse minimale de plutonium 239 pouvant conduire, dans les conditions les plus favorables pour la réaction, à un  $k_{\text{eff}}$  égal à 1 est d'environ 0,5 kg, alors qu'elle est de 4,5 kg à sec. Pour certains milieux fissiles, tel que l'uranium enrichi à moins de 6,6 % en isotope 235 sous forme d'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 prévention du risque de criticité peut donc reposer sur **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 installations et les quantités nécessaires pour atteindre la criticité sont généralement plus importantes que pour l'hydrogène. Même si l'hydrogène est un meilleur modérateur que le graphite, c'est aussi un plus fort absorbant neutronique. Ainsi, pour des quantités quelconques de modérateur, le graphite peut conduire à des facteurs de multiplication effectifs plus importants que l'eau.

### 3.4. 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 de fission 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.

<sup>4</sup> On parle alors de neutrons « rapides ».

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, etc.).

La prévention du risque de criticité peut donc reposer sur **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 aux « facteurs organisationnels et humains », 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, aux déformations liées au vieillissement, etc.) considérés alors comme étant de géométrie sûre. Des dispositions doivent par ailleurs être prises lors des modifications ou des changements d'équipement pour garantir le maintien de la géométrie. Une surveillance particulière des liaisons possibles entre appareils de géométrie sûre et appareils de géométrie non sûre (dite « 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 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 le  $k_{\text{eff}}$  du système étudié : le regroupement d'équipements sous-critiques individuellement peut conduire à un système surcritique.

### 3.5. Capture "non fissile" des neutrons

La disparition de neutrons, à la suite de captures ne conduisant pas à une fission, entraîne la baisse du  $k_{\text{eff}}$ , ce qui est favorable au maintien de la sous-criticité. Des isotopes, fréquemment rencontrés dans les milieux fissiles, peuvent conduire à ces captures et donc limiter le risque de criticité. Parmi les principaux, figurent les isotopes 238 de l'uranium et 240 du plutonium. 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** (définition au § 4).

En outre, parmi les éléments naturels, quatre sont particulièrement efficaces pour capturer les neutrons. Il s'agit du bore (isotope 10), du cadmium (isotope 113), du hafnium (isotope 177) et du gadolinium (isotopes 155 et 157). 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 du risque de criticité. Le mode de contrôle par « **l'empoisonnement** » est alors retenu.

En dehors de ces quatre matériaux très neutrophages, d'autres noyaux peuvent également conduire à des captures des neutrons. 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 encore 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, qui devient prépondérant par rapport à la modération apportée par celle-ci.

La prévention du risque de criticité peut ainsi reposer sur **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 « réactivité » d'un milieu en fonction de la quantité d'hydrogène présente un maximum, correspondant au meilleur compromis entre la modération et la capture des neutrons par l'hydrogène. Ce maximum est appelé l'optimum de modération.

Enfin, pour les opérations concernant des combustibles irradiés (ou « usés »), il est possible de tenir compte de la capture des neutrons par certains produits de fission dans la mesure où l'on peut garantir leur présence. Par exemple, les samarium 149, samarium 152, gadolinium 155, césium 133, néodyme 143, rhodium 103 et molybdène 95, stables et non volatils, contribuent de manière significative aux captures de neutrons et sont parfois utilisés pour la justification de la sous-criticité d'une configuration impliquant des combustibles irradiés. Toutefois, la qualification des données de base (sections efficaces, etc.) associées à ces produits de fission et des méthodes d'estimation de biais de calcul intégrant ces derniers (cf. § 4.3 concernant la qualification) font encore l'objet de travaux de développement, du fait du faible nombre d'expériences disponibles ou de difficultés d'exploitation de ces dernières.

## 4. PREVENTION DU RISQUE DE CRITICITE

### 4.1. Unités de criticité, modes de contrôle de la criticité et milieux fissiles de référence

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

**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 (aussi appelés poisons neutroniques).**

Dans une analyse de sûreté-criticité, 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 criticité<sup>5</sup>. Cette étape se conclut par le choix d'un ou plusieurs **modes de contrôle** de la criticité (géométrie, masse, modération, concentration, empoisonnement ou une combinaison de ces derniers) et d'un ou de plusieurs **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. Dans une seconde étape, l'analyse des scénarios d'incident ou d'accident peut conduire à retenir un ou des modes de contrôle différents de ceux initialement retenus pour le fonctionnement normal.

**Le milieu fissile de référence** est un milieu fissile enveloppé<sup>6</sup> 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 ou des modes de contrôle de la criticité et de l'environnement retenus. Le milieu fissile de référence peut, pour un équipement donné, différer selon les scénarios analysés, notamment si ces scénarios conduisent à une modification des paramètres définissant le milieu fissile de référence, à savoir la forme physico-chimique de la matière fissile, sa composition, sa nature homogène ou hétérogène et le type de modérateur(s) éventuellement associé(s).

<sup>5</sup> Selon le projet de guide [4], une unité de criticité est une partie de l'installation dont le contour est défini et à l'intérieur de laquelle sont définies des règles uniformes de prévention du risque de criticité.

<sup>6</sup> Ce milieu fissile de référence peut être fictif et n'être retenu que pour couvrir certains phénomènes physico-chimiques susceptibles de se produire (cas, par exemple, du PuO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> utilisé pour couvrir les précipités de plutonium).

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, etc.). 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 dans la démonstration de la maîtrise du risque de criticité et d'en déduire les paramètres enveloppes pour la sûreté. Les valeurs des paramètres non retenus au titre du mode de contrôle de la criticité sont choisies de manière à maximiser le facteur de multiplication effectif résultant.**

La définition d'une unité de criticité, d'un mode de contrôle et d'un milieu fissile de référence 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, etc.) et au milieu fissile de référence.

### **Cas particulier des cœurs non constitués**

Pour le cas des cœurs non constitués de réacteurs, la démarche d'analyse présente des spécificités. Dans ce cas particulier, les concepts de milieu fissile de référence et de mode de contrôle de la criticité ne sont pas directement applicables. En effet, l'application *stricto sensu* de la définition du milieu fissile de référence conduirait dans la plupart des cas à des  $k_{eff}$  non admissibles pour les configurations d'études de chargement/déchargement des cœurs, ces derniers étant conçus pour être critiques avec des hypothèses les plus proches de la réalité possible (chaque assemblage irradié est modélisé avec son taux de combustion moyen « exact »). L'absence de recours à un milieu fissile de référence implique que la notion de mode de contrôle de la criticité n'a alors plus lieu d'être, cette notion n'ayant par définition un sens qu'en l'associant à un milieu fissile de référence. Enfin, le terme d'unité de criticité est peu utilisé pour désigner la zone du réacteur (par exemple la cuve pour un réacteur de puissance) où sont analysées les opérations présentant un risque de criticité.

En pratique, de manière à pouvoir justifier le respect des critères d'admissibilité au regard des situations à examiner, l'analyse du risque de criticité pour les cœurs non constitués repose le plus souvent sur des études considérant des modèles de calculs affinés (modélisation détaillée des éléments fissiles et neutrophages propres à chaque type d'élément combustible, prise en compte du plan de chargement et de l'irradiation de certains des assemblages combustibles, etc.)<sup>7</sup>. Ces études sont ainsi en général moins conservatives que celles des démonstrations de sûreté-criticité appliquées aux usines. L'analyse peut également s'appuyer sur des dispositions pratiques spécifiques (opérations réalisées à sec, chargement selon le principe d'une approche sous-critique en s'appuyant notamment sur des mesures effectuées en continu, etc.) permettant de garantir le maintien de la sous-criticité. Dans ces deux approches, et de manière analogue aux autres installations, les analyses conduisent à définir un ensemble d'exigences de sûreté-criticité qui s'apparentent finalement aux paramètres associés aux modes de contrôle de la criticité précités. Le respect de ces exigences est contrôlé par des dispositions techniques et organisationnelles (suivi du respect du plan de chargement, moyens de mesure en continu, etc.).

## **4.2. Analyse de la sûreté-criticité**

L'analyse de la sûreté-criticité retient non seulement les conditions de fonctionnement dites normales, mais aussi les dysfonctionnements envisageables. Dans ce cadre, la « décision criticité » constitue la référence réglementaire au niveau français pour la maîtrise du risque de criticité, aussi bien pour les concepteurs que les exploitants d'installations civiles. Pour les INBS, le contenu de l'instruction DSND n° 34 de l'ASND joue un rôle équivalent à celui de la "décision criticité".

<sup>7</sup> Il est à noter que ces calculs prennent en compte la géométrie des assemblages qui doit donc être garantie sur le principe (ce qui se rapproche d'un mode de contrôle par la géométrie garanti implicitement).

La « décision criticité » et l'instruction DSND n°34 énoncent comme principe général, dit « principe de double éventualité », qu'un « accident de criticité ne doit en aucun cas découler d'une seule anomalie »<sup>8</sup> et que « 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 deux 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. »

L'article 6 de l'instruction DSND n° 34 (consacré aux ports et aux réacteurs embarqués) spécifie qu'en amont des opérations de chargement/déchargement d'un cœur de réacteur, des situations au-delà du principe de la double éventualité (i.e. faisant suite à au moins deux anomalies concomitantes, indépendantes, chacune de faible probabilité et détectable dans un délai permettant une intervention rapide) sont postulées et étudiées afin de démontrer, par calcul, leur caractère sous-critique. Ces dispositions sont liées aux particularités de ces cœurs en termes d'organisation (cf. § 5) et de risques.

La « décision criticité » et l'instruction DSND n° 34 préconisent en outre de préciser, pour chaque partie de l'installation (i.e. unité de criticité), le ou les mode(s) de contrôle de la criticité, le ou les milieu(x) fissile(s) de référence et les dispositions associées, en cohérence avec l'analyse des défaillances réalisée selon le principe de « double éventualité » précité.

Les diagrammes présentés en annexe, basés sur les principes définis dans la « décision criticité » et l'instruction DSND n° 34 :

- résumant les démarches d'analyse présentées dans ces documents ;
- 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 diagrammes, développés par l'IRSN et susceptibles d'évoluer avec le retour d'expérience, constituent un guide d'analyse de la maîtrise du risque de criticité, que ce soit pour la constitution de dossiers de sûreté ou pour l'expertise des analyses de sûreté-criticité présentées dans ces derniers. Ils ont pour objectif de lister des questions standards, « ouvertes », que doit se poser le spécialiste en criticité, **sans prétention d'exhaustivité**.

### 4.3. Marges et critères de dimensionnement

L'existence de marges est essentielle pour garantir la sûreté des installations afin de s'affranchir d'éventuels manques dans l'analyse (l'exhaustivité de cette dernière étant difficile à garantir, compte tenu de l'influence de paramètres multiples). Dans le cas du risque de criticité, l'analyse de sûreté devra donc définir les valeurs limites admissibles pour chaque paramètre, l'état critique constituant une limite qui ne doit jamais être atteinte.

---

<sup>8</sup> Comme l'indiquent l'article 2.4 de la « décision criticité » et l'article 3.4 de l'instruction DSND n°34, il est possible de déroger exceptionnellement au principe de « double éventualité » dans certains cas particuliers, à condition de justifier que ce principe ne peut pas être appliqué et de mettre en œuvre des dispositions permettant de rendre les scénarios d'accidents en cause extrêmement improbables avec un haut degré de confiance (par exemple, exclure la chute d'un conteneur à partir du haut degré de fiabilisation du pont de manutention associé, etc.).



Cependant, la « décision criticité » n'énonce pas, pour le facteur de multiplication effectif ( $k_{\text{eff}}$ ), de critère réglementaire chiffré de la marge à respecter par rapport à la valeur de 1 (correspondant à l'état critique), étant donné qu'il n'est pas possible de considérer, de façon simpliste, que cette marge se traduit uniquement par une marge « administrative » prédéfinie.

En effet, l'appréciation des marges d'une configuration ou d'une situation tient compte principalement de quatre critères : l'évaluation de la sensibilité de variation du  $k_{\text{eff}}$  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, etc.), 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 accordé aux techniques de calcul utilisées par rapport à la configuration étudiée. Dans le cas des cœurs en cours de constitution, l'existence de moyens de détection de la perte de la maîtrise de la sous-criticité (mesures en continu par exemple) peut être valorisée pour justifier une réduction de la marge, à condition que l'efficacité et la fiabilité de ces moyens pour prévenir l'occurrence d'une excursion critique soient démontrées.

S'agissant de la sensibilité de variation du  $k_{\text{eff}}$  en fonction des paramètres contrôlés, certains milieux fissiles voient leur  $k_{\text{eff}}$  varier de façon très importante pour une faible variation d'un paramètre. C'est le cas par exemple des milieux constitués de plutonium ou d'uranium très enrichi. A contrario, certains milieux fissiles, par exemple des milieux très faiblement enrichis, présentent des variations très faibles de  $k_{\text{eff}}$  en cas de variation des paramètres de contrôle, nécessitant sur le principe des marges à la criticité moins importantes.

S'agissant du degré de confiance accordé aux techniques de calcul, il doit particulièrement être examiné lorsque la configuration traitée présente un  $k_{\text{eff}}$  relativement élevé, et cet examen est effectué en deux étapes. La première étape consiste à obtenir des éléments de qualification d'un moyen de calcul en comparant des résultats de calculs d'expériences critiques (benchmarks) à des valeurs expérimentales (dans la mesure du possible<sup>9</sup>). Les écarts obtenus sont ensuite interprétés afin de déterminer l'origine des biais observés (approximations, options de calculs, données nucléaires). La seconde étape consiste à transposer ces écarts 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 de qualification ainsi déterminé est donc fortement dépendant de la représentativité des expériences sélectionnées et de la qualité de ces expériences, les valeurs expérimentales étant par nature entachées d'incertitudes. Les critères d'admissibilité et les valeurs des paramètres de criticité doivent alors être fixés à la lumière de l'état de la qualification des formulaires de calcul pour les configurations étudiées, en intégrant éventuellement des marges « forfaitaires » jugées suffisantes par l'expert lorsque le nombre d'expériences représentatives est faible ou nul.

## 5. ORGANISATION ET FORMATION

Comme cela a été évoqué précédemment, la maîtrise du risque de criticité implique le respect des limites de certains paramètres associés aux modes de contrôle retenus (masse, modération, etc.). Ceci conduit l'exploitant à mettre en place des dispositions (en particulier des procédures) imposant des exigences strictes d'exploitation, certaines pouvant être sensibles aux « facteurs organisationnels et humains ». Ainsi, l'organisation se doit d'être la plus claire possible et adaptée aux besoins et aux activités de l'exploitant.

Dans cet objectif, les rôles et missions de chaque acteur (ingénieur criticien, opérateur, chef de quart, etc.) doivent être définis explicitement. À cet égard, la « décision criticité » et l'instruction DSND n° 34 stipulent qu'il doit être prévu l'existence de personnes compétentes en criticité, d'une part parmi le personnel en

<sup>9</sup> Pour certains milieux fissiles et/ou certains spectres d'énergie, il existe peu, voire il n'existe pas, d'expériences critiques permettant d'apporter des éléments de qualification des codes de calcul. A défaut d'expériences, en première approche, l'utilisation de codes Monte Carlo à énergie continue permet de minimiser les biais dus au schéma de calcul.



charge de l'exploitation de l'installation, d'autre part indépendantes de celui-ci (dans ce cas, il peut s'agir d'un *ingénieur critiqueur habilité* tel que défini dans la « décision criticité » et dans l'article 5 de l'instruction DSND n° 34, concernant l'organisation dans les IANID ne relevant pas de l'autorité du ministère de la Défense). L'existence de ces deux acteurs est primordiale pour la garantie de la sûreté-criticité. Le premier acteur est le plus proche « du terrain » et de l'application des procédures lors de la mise en œuvre de matières fissiles, et ainsi le plus à même, compte tenu de sa connaissance des procédés, de détecter et d'anticiper des difficultés d'exploitation et les éventuelles dérives associées. Le second apporte son expertise de manière indépendante du premier et possède une vision plus large de l'ensemble des activités, permettant d'assurer la cohérence des analyses de sûreté-criticité de ces dernières. L'article 4.1.2 de la « décision criticité » de l'ASN et l'article 5 de l'instruction DSND n° 34 spécifient les missions que doivent assurer les personnes compétentes en criticité. Ces spécifications sont reproduites dans les premiers diagrammes en annexe.

Les exigences organisationnelles spécifiées dans l'article 6 de l'instruction DSND n° 34 (consacré aux IANID relevant de l'autorité du ministère de la Défense, i.e. les ports et les réacteurs embarqués) diffèrent un peu, tout en conservant l'exigence de personnes compétentes en criticité à la fois au sein de l'équipe d'exploitation et en dehors de cette dernière. Cet article précise la mise en place, lors des phases de chargement/déchargement de cœur, d'une organisation spécifique répondant à des exigences additionnelles de sûreté, fondée sur des procédures et de multiples points d'arrêt assurant un double contrôle indépendant de chaque opération individuelle.

Les personnes compétentes en criticité doivent avoir suivi une formation leur permettant d'assurer leurs missions, cette formation pouvant toutefois être adaptée à l'enjeu de sûreté-criticité de l'installation concernée.

En outre, une de leurs missions est de sensibiliser au risque de criticité le personnel intervenant dans les zones où des matières fissiles sont mises en œuvre et de former de manière plus approfondie le personnel amené à manipuler cette matière.

## 6. LIMITATION DES CONSEQUENCES DOSIMETRIQUES D'UN ACCIDENT DE CRITICITE

Les dispositions de prévention du risque de criticité doivent rendre très improbable la survenue d'un accident de criticité dans une installation. Toutefois, en cohérence avec le principe de la défense en profondeur, malgré toutes les dispositions prises, il convient de considérer l'occurrence d'un tel accident et d'en limiter les conséquences dosimétriques.

Ainsi, l'exploitant doit identifier, s'ils existent, les sièges potentiels d'un accident de criticité dans son installation, c'est-à-dire les procédés et les locaux où le risque d'occurrence d'un accident est le plus important au regard du cumul d'anomalies envisageable. Ce travail, difficile dans la mesure où, par définition, l'accident de criticité est un événement imprévu et non désiré, est un préalable à la mise en œuvre des dispositions visant à limiter les conséquences dosimétriques d'un éventuel accident. Ces dispositions s'articulent autour de trois axes principaux : la détection de l'accident et le déclenchement de l'alarme d'évacuation associée, la protection radiologique du personnel, des équipes de secours et de la population, et enfin la gestion de crise incluant, si nécessaire, les interventions visant à arrêter l'accident et revenir à un état sûr.

## 6.1. Détection de l'accident de criticité

Eu égard à sa cinétique, il n'existe pas, dans la majorité des cas, de signe précurseur exploitable aujourd'hui pour identifier l'imminence d'un accident de criticité. Par conséquent, les systèmes de détection d'accident de criticité existants (SyDAC), qui sont des équipements spécifiques, visent à mesurer le flux important de neutrons et/ou de rayonnements gamma émis dès le début de l'accident de criticité et à générer une alarme d'évacuation réflexe du personnel. Ces systèmes, qui ne permettent donc pas d'éviter les conséquences dosimétriques associées aux premiers instants de l'accident, potentiellement létales pour les opérateurs situés à proximité, contribuent néanmoins à limiter ses conséquences globales, l'évacuation réflexe du personnel permettant de réduire les doses intégrées par ce dernier. Le choix d'implanter ou non un tel système doit ainsi être effectué sur la base du bénéfice qu'il peut apporter en termes de réduction des conséquences dosimétriques ou radiologiques pour les personnes ou l'environnement et dépend donc de certaines considérations propres à l'installation (accident susceptible de ne pas se limiter à un unique pic de puissance compte tenu du procédé, pouvant survenir à un endroit peu « radioprotégé », etc.). Il est donc important de souligner que l'absence de SyDAC dans une installation ne signifie pas nécessairement l'absence totale de risque d'occurrence d'un accident de criticité dans cette dernière.

Le diagramme intitulé « sièges potentiels et détection d'un accident de criticité », à la fin de l'annexe, décrit les dispositions et les éléments d'analyse relatifs à la détection d'un accident de criticité et l'alarme associée (couverture des sièges potentiels d'accident, accident minimal détectable, continuité de la détection et de l'alarme en cas d'indisponibilité, risque de fausse alarme, détection à partir de moyens non dédiés, etc.).

## 6.2. Protection du personnel, des équipes de secours et de la population

En cas d'accident de criticité, les conséquences pour le personnel présent dans l'installation sont principalement dues à l'irradiation directe (neutrons et gamma), alors que celles pour le public sont en règle générale majoritairement liées à l'activité des gaz et des aérosols mis en suspension par l'accident et rejetés dans l'environnement (produits de fission, matière fissile et autres radionucléides).

Sur la base de calculs de conséquences dosimétriques prévisionnels, des plans d'urgence de protection<sup>10</sup> sont établis afin notamment d'anticiper les mesures nécessaires pour protéger les travailleurs et la population des conséquences d'un accident de criticité.

Pour les personnes présentes dans l'installation, la limitation des conséquences dosimétriques d'un accident de criticité repose en premier lieu sur une évacuation rapide hors de la zone concernée dans les instants suivant la détection de l'accident. Le personnel doit donc être entraîné à évacuer très rapidement les lieux vers des points de rassemblement, selon des cheminements préalablement définis et fléchés. Une organisation doit être prédéfinie pour identifier les personnes les plus gravement irradiées et pour pouvoir évaluer les doses reçues, dans la perspective d'une prise en charge médicale. En cas de conséquences importantes, des protections radiologiques adaptées, notamment à l'intervention possible de secours extérieurs, doivent être prévues.

Enfin, si les conséquences dosimétriques prévisionnelles d'un accident de criticité sont susceptibles de dépasser les niveaux de doses réglementaires au-delà desquels des actions de protection des populations (mise à l'abri, etc.)<sup>11</sup> sont recommandées, l'exploitant établit et tient à jour les éléments correspondants nécessaires à l'établissement d'un PPI et les transmet au préfet.

<sup>10</sup> Le Plan d'urgence interne (PUI) et le Plan Particulier d'Intervention (PPI) sont respectivement établis par les exploitants (pour le site) et les pouvoirs publics (pour les populations hors du site).

<sup>11</sup> L'article D1333-84 du Code de la Santé Publique (en vigueur depuis le 1<sup>er</sup> juillet 2018) préconise comme valeurs repères des doses efficaces de 10 mSv pour la mise à l'abri de la population et de 50 mSv pour son évacuation.

### 6.3. Gestion de crise et moyens d'arrêt d'un accident de criticité

Outre les aspects développés au § 6.2, dont la finalité est de mettre en sécurité le personnel et de porter secours aux victimes, la gestion de crise au niveau du site doit prévoir des moyens d'arrêt de l'accident de criticité pour assurer un retour définitif à la sous-criticité. En effet, un accident de criticité ne s'arrêtant que rarement tout seul, il peut être nécessaire d'entreprendre des actions spécifiques en ce sens, pouvant inclure des interventions humaines (par exemple, par injection de poison neutronique ou transfert de la solution fissile incriminée dans une géométrie sous-critique), comme l'a montré l'accident de criticité survenu en 1999 à Tokai-Mura au Japon.

L'organisation de crise doit être périodiquement testée au travers d'exercices scénarisant un accident de criticité ou des situations à risque de criticité et permettant d'entraîner l'ensemble des parties prenantes.

## 7. MISE EN ŒUVRE D'UN SYSTEME DE MESURE NUCLEAIRE POUR GARANTIR LE RESPECT D'UNE LIMITE DE SURETE-CRITICITE

Le contrôle du respect des limites des paramètres associés à la justification de la sous-criticité peut se fonder sur des mesures de natures très diverses :

- mesures de masse (pesées) ;
- mesures de rayonnements nucléaires (comptage neutronique passif ou actif, spectrométrie gamma) :
  - nature (spectrométrie gamma) ;
  - isotopie (spectrométrie gamma) ;
  - masse de matière fissile ;
  - taux de combustion ;
  - rétention de matière fissile ;
  - etc. ;
- mesures de masses de matières fissiles par calorimétrie ;
- mesures analytiques, chimiques ou radiochimiques (analyses élémentaires ou isotopiques sur prélèvements) ;
- mesures dimensionnelles ;
- etc.

Parmi ces dispositifs, les mesures nucléaires (spectrométries gamma, comptages neutroniques, etc.) sont souvent complexes.

Contrairement à la mesure nucléaire dédiée à la gestion des matières nucléaires (pour des aspects de non-prolifération) qui vise à être la plus précise possible, la mesure nucléaire à des fins de sûreté-criticité doit conduire à une évaluation enveloppe du paramètre de sûreté-criticité à garantir compte tenu des incertitudes. Ces systèmes de mesures doivent être qualifiés sur l'ensemble du domaine des valeurs à mesurer envisageables et le respect des limites associées (matière, environnement) doit être vérifié. Ainsi, les diagrammes présentés en annexe exposent les questions à se poser lors de l'utilisation d'un système de mesure nucléaire pour garantir le respect d'une limite de sûreté-criticité.

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

**La maîtrise du risque de criticité dans les installations nucléaires est obtenue en imposant des limites strictes à certains paramètres de contrôle bien identifiés.** Ces limites sont définies grâce à l'étude exhaustive des conditions de criticité de l'ensemble des équipements et des activités susceptibles de mettre en œuvre des matières fissiles en fonctionnement normal et pour les situations d'incident ou d'accident, 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 éventualité » énoncé dans la « décision criticité » et l'instruction DSND n° 34.

**Les outils de calculs de criticité ont atteint un niveau élevé de précision grâce aux progrès réalisés dans les modèles de traitement neutronique et dans la connaissance des données nucléaires de base.** Ils permettent en particulier, grâce à des études paramétriques ou de sensibilité, de rechercher les meilleures conditions de sûreté, sans approximations excessives, pour la majorité des situations. Des développements et des travaux relatifs à l'estimation des biais (développement de méthodes, amélioration des éléments de qualification, etc.) en cours visent à en améliorer encore la précision, par exemple pour les calculs concernant les assemblages combustibles usés ou les assemblages combustibles avec des crayons manquants, afin de mieux évaluer les marges.

Toutefois, le recours à des modélisations détaillées a pour conséquence la nécessité, d'une part de garantir que les éléments (géométriques, chimiques, etc.) pris en compte dans les modélisations sont garantis au regard des scénarios considérés et dans le temps (vieillesse, etc.), d'autre part de justifier plus finement la qualification des schémas de calcul pour la configuration étudiée, ce qui complexifie la démarche. Cette justification est souvent confrontée au manque d'expériences de criticité représentatives de la configuration envisagée. Les programmes de recherche développés par l'IRSN et ses partenaires nationaux et internationaux vont dans le sens d'accroître les éléments de qualification des outils de calculs disponibles et d'en améliorer la qualité.

**En tout état de cause, les résultats des calculs de criticité doivent venir en appui des analyses ou 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 du risque de criticité est assurée par les hommes et les femmes qui exploitent les installations ! Les défaillances organisationnelles et humaines 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 du risque de criticité et l'importance de la vigilance de tous les acteurs. Cela passe par l'appropriation par tous d'une bonne culture de sûreté.**

## GLOSSAIRE

*Les définitions ci-dessous sont issues de la « décision criticité » de l'ASN et de l'instruction DSND n° 34. En l'absence de précision particulière, les définitions sont identiques dans les deux documents.*

**Accident de réactivité (instruction DSND n°34) :** augmentation incontrôlée de la réactivité dans un cœur de réacteur ;

**Anomalie :** évènement déclencheur ou écart ;

**Anomalies indépendantes :** anomalies ne résultant pas d'une cause commune directe ;

**Cœur constitué :** cœur formé de la totalité de ses éléments combustibles et autres éléments ;

**Cœur non constitué :** cœur en cours de chargement ou déchargement de ses éléments combustibles et autres éléments ;

**Conception prudente (instruction DSND n°34) :** démarche intégrant des marges de dimensionnement et recourant, en tant que de besoin, à une redondance, une diversification et une séparation physique adéquates des éléments importants pour la protection qui assurent des fonctions nécessaires à la démonstration de sûreté nucléaire (Article 3.1.II de l'arrêté ASN du 7 février 2012 fixant les règles générales relatives aux installations nucléaires de base) ;

**Configurations normales :** au sens de la sûreté-criticité, configurations d'étude considérées pour démontrer la sous-criticité du fonctionnement normal et du fonctionnement en mode dégradé, les valeurs des paramètres non retenus au titre du mode de contrôle de la criticité étant choisies, pour ces configurations, de manière à maximiser le facteur de multiplication effectif résultant ;

**Configurations anormales :** au sens de la sûreté-criticité, configurations d'étude considérées pour démontrer la sous-criticité des situations d'incident et d'accident retenues dans la démonstration de sûreté nucléaire, les valeurs des paramètres non retenus au titre du mode de contrôle de la criticité étant choisies, pour ces configurations, de manière à maximiser le facteur de multiplication effectif résultant ;

**Evènement déclencheur (instruction DSND n° 34) :** défaillance interne, ou agression interne ou externe, susceptible d'être à l'origine, directement ou indirectement, d'une situation d'incident ou d'accident (définition issue de l'article 1.3 de l'arrêté ASN du 7 février 2012) ;

**Ingénieur criticien :** personne ayant reçu une formation qualifiante en sûreté-criticité ;

**Matière fissile :** matière constituée d'éléments chimiques dont certains isotopes sont fissiles ;

**Matière modératrice :** matière constituée d'éléments chimiques modérateurs ;

**Milieu fissile :** milieu physico-chimique contenant, entre autres, de la matière fissile ;

**Milieu fissile de référence** : 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 pénalisantes compte tenu du mode de contrôle retenu ;

**Risque de criticité** : risque de déclenchement d'une réaction de fission en chaîne incontrôlée au sein d'un milieu initialement sous-critique. Un milieu fissile devient critique lorsque le taux de production de neutrons (par les fissions de ce matériau) est exactement égal au taux de disparition des neutrons (absorptions et fuites à l'extérieur) ;

**Sous-criticité (« décision criticité » de l'ASN)** : état d'un milieu sous-critique ;

**Sous-criticité (instruction DSND n° 34)** : état d'un milieu sous-critique dans lequel le système ne peut pas déclencher ni entretenir une réaction en chaîne ;

**Sûreté-criticité** : ensemble des dispositions techniques et organisationnelles prévues pour assurer la maîtrise du risque de criticité.

## Acronymes

**ACQ** : Activités Concernées par la Qualité (*terme utilisé dans les IANID*)

**AIP** : Activité Importante pour la Protection (*terme utilisé dans les INB*)

**ASN** : Autorité de Sûreté Nucléaire

**ASND** : Autorité de Sûreté Nucléaire de Défense

**DSND** : Délégué à la Sûreté Nucléaire et à la radioprotection pour les installations et activités intéressant la Défense

**EIP** : Élément Important pour la Protection (*terme utilisé dans les INB*)

**IANID** : Installations et Activités Nucléaires Intéressant la Défense

**INB** : Installations Nucléaires de Base

**INBS** : Installations Nucléaires de Base Secrètes

**RGE** : Règles Générales d'Exploitation

**RGSE** : Règles Générales de Surveillance et d'Entretien

**RS** : Rapport de Sûreté

**SyDAC** : système de détection d'accident de criticité

## REFERENCES

- [1] Guide d'analyse IRSN/DSU/SEC/T/2010.105 – Indice A du 27 juillet 2010.
- [2] Arrêté du 7 février 2012 fixant les règles générales relatives aux installations nucléaires de base, NOR : DEVP1202101A.
- [3] Décision n°2014-DC-0462 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 7 octobre 2014.
- [4] Projet de guide n°26 de l'ASN, relatif à la maîtrise du risque de criticité dans les installations nucléaires de base, version du 13 septembre 2019.
- [5] Arrêté du 26 septembre 2007 fixant la réglementation technique générale destinée à prévenir et limiter les nuisances et les risques externes résultant de l'exploitation des installations nucléaires de base secrètes, NOR : DEFD0766593A.
- [6] Instruction DSND n°34 Indice 0 du 24 juillet 2020, diffusée par lettre ASND/2020-00503 du 24 juillet 2020.
- [7] Précis de neutronique – Paul Reuss – EDP Sciences - Collection Génie Atomique – Janvier 2003.
- [8] Fission nucléaire, réactions en chaîne et criticité – Paul Reuss – EDP Sciences - Collection QuinteSciences – Mars 2016.
- [9] LA-13638 – A Review of Criticality Accidents (Révision de 2000) – Los Alamos.

# ANNEXES

**Annexe 1. Synoptique d'analyse du risque de criticité ..... 25**



## Annexe 1. Synoptique d'analyse du risque de criticité

Les diagrammes présentés dans cette annexe résument d'abord les méthodes d'analyse préconisées par la « décision criticité » de l'ASN et par l'instruction DSND n° 34, ensuite, pour le milieu fissile de référence et chaque mode de contrôle de la criticité (cas des usines), les paramètres devant être pris en compte, les défaillances à étudier et les scénarios types associés à ces défaillances. D'autres diagrammes sont ensuite présentés pour ce qui concerne les paramètres relatifs aux cœurs non constitués des réacteurs, aux réflexions et interactions neutroniques, aux mesures nucléaires et aux accidents de criticité (sièges potentiels, détection, alarme, gestion et protection).

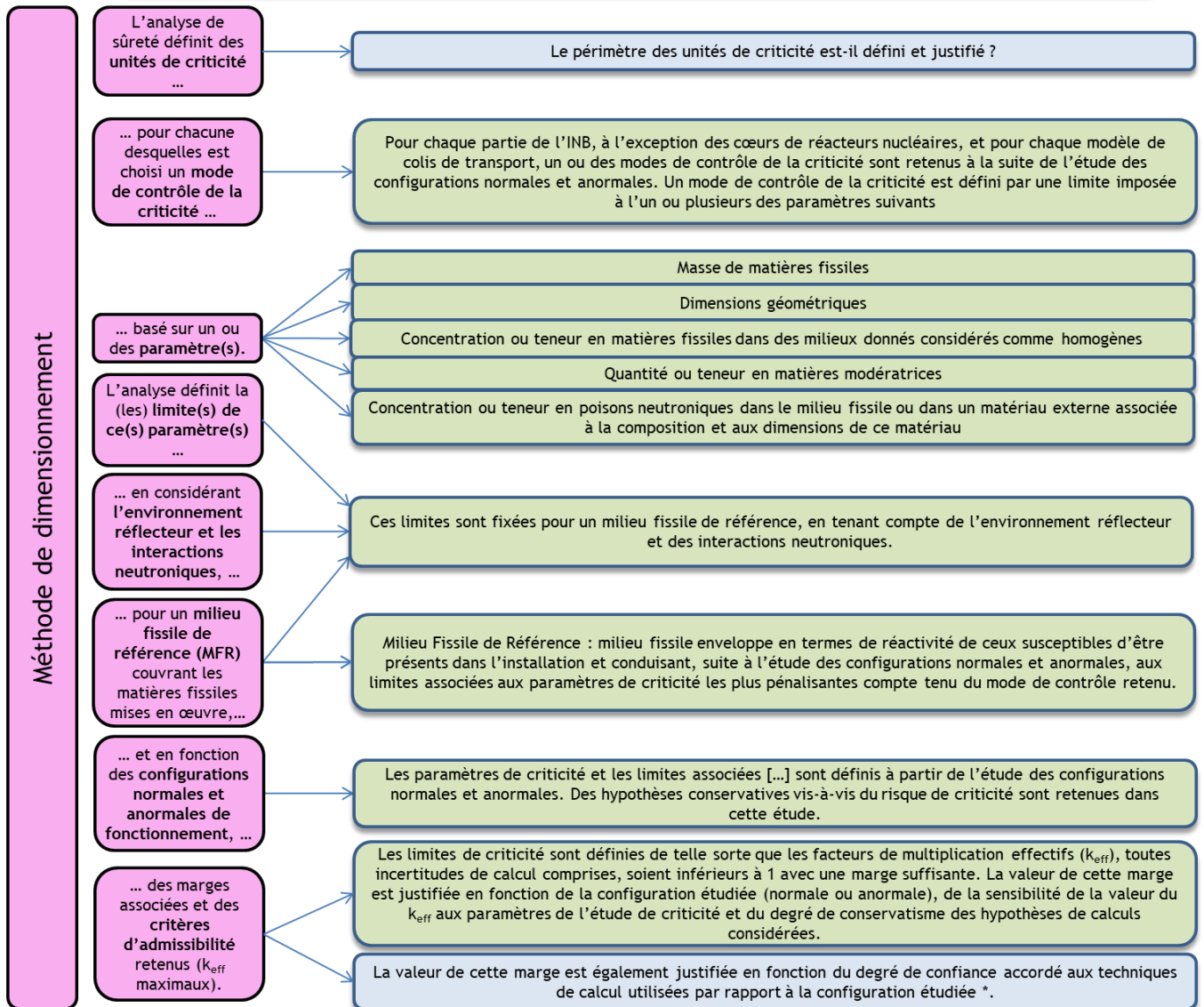
L'objectif de ces diagrammes est d'être un support, **sans prétention d'exhaustivité**, à l'établissement ou l'expertise d'une analyse du risque de criticité. Ils visent à identifier, via des questions « ouvertes », les points devant être analysés, mais ne préconisent pas de solutions techniques. En 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.

## Démarche générale pour la prévention du risque de criticité, dimensionnement des usines appartenant aux INB et aux IANID

Cases vertes : extraits de la « décision criticité » de l'ASN (les formulations dans l'instruction DSND n°34 sont identiques, à quelques exceptions près).

Cases bleues : autres éléments analysés.

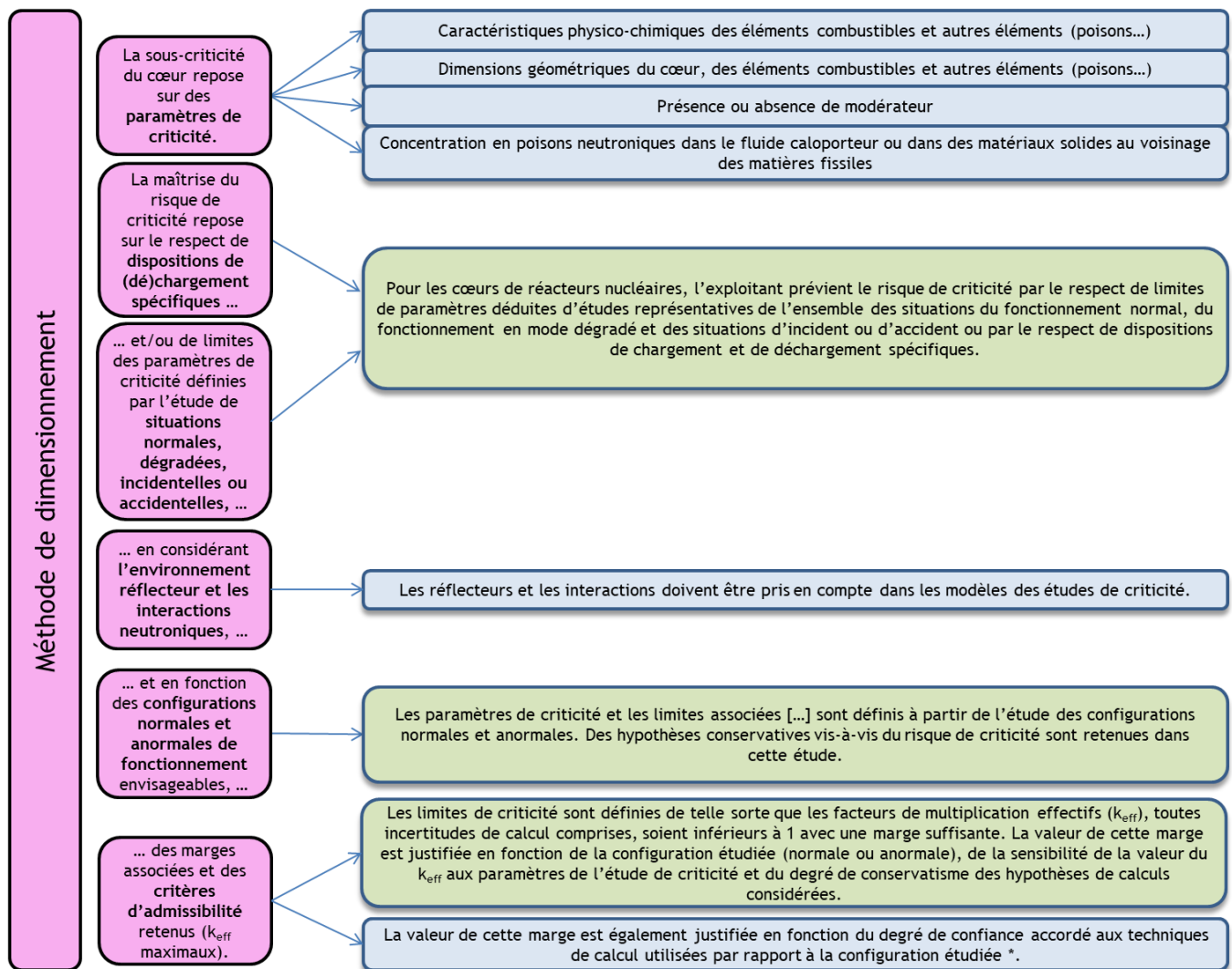


\* Ce dernier élément est spécifié dans l'article 3.8 de l'arrêté du 7 février 2012 fixant les règles générales relatives aux Installations Nucléaires de Base.

## Démarche générale pour la prévention du risque de criticité, dimensionnement des réacteurs non constitués appartenant aux INB et aux IANID

Cases vertes : extraits de la « décision criticité » de l'ASN (les formulations dans l'instruction DSND n°34 sont identiques, à quelques exceptions près).

Cases bleues : autres éléments analysés.

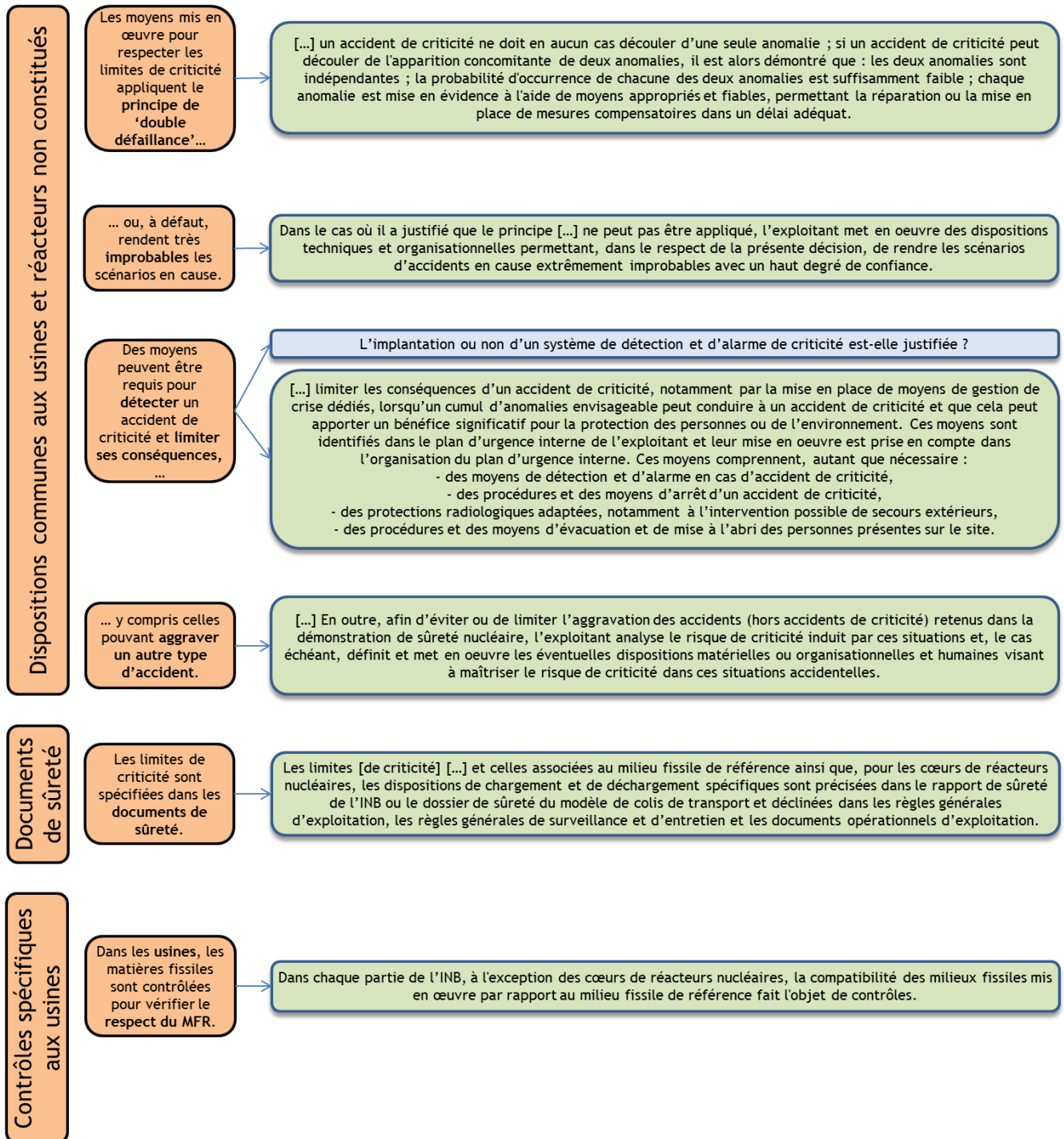


\* Ce dernier élément est spécifié dans l'article 3.8 de l'arrêté du 7 février 2012 fixant les règles générales relatives aux Installations Nucléaires de Base.

## Démarche générale pour la prévention du risque de criticité, dispositions dans les usines et réacteurs non constitués appartenant aux INB et aux IANID

Cases vertes : extraits de la « décision criticité » de l'ASN (les formulations dans l'instruction DSND n°34 sont identiques, à quelques exceptions près).

Cases bleues : autres éléments analysés.



**Démarche générale pour la prévention du risque de criticité, organisation dans les usines et réacteurs appartenant aux INB et aux IANID ne relevant pas de l'autorité du ministère de la Défense**

Cases vertes : extraits de la « décision criticité » de l'ASN (les formulations dans l'instruction DSND n°34 sont identiques, à quelques exceptions près).

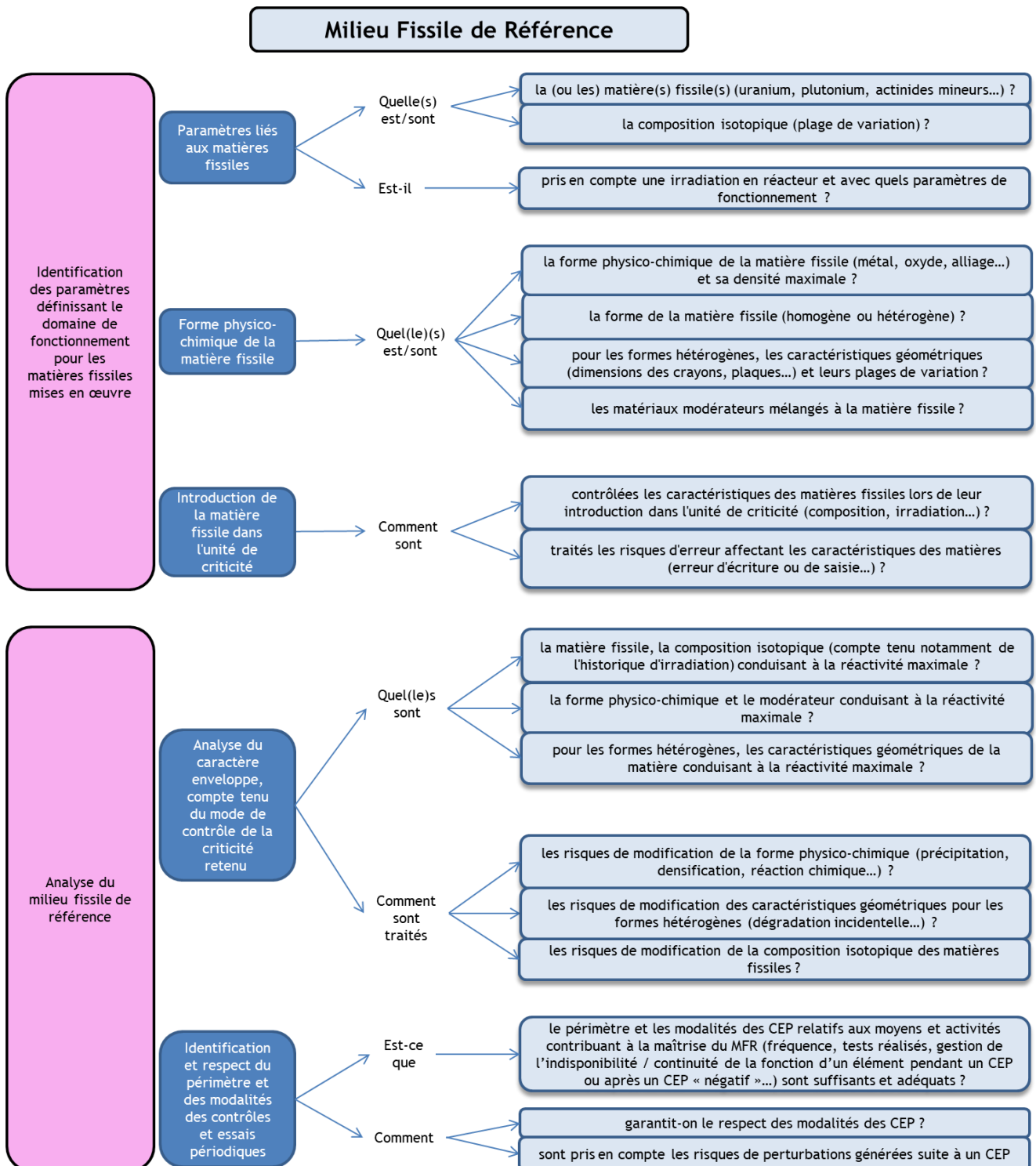
Organisation des INB et des IANID ne relevant pas de l'autorité du ministère de la Défense

Des ingénieurs critiques indépendants de l'exploitation et des agents compétents en criticité parmi le personnel d'exploitation donnent des avis techniques, contribuent à former les agents et prendre en compte le REX, ...

- a) [...] existence d'un ou plusieurs ingénieurs critiques habilités ou [...] au minimum de personnes clairement identifiées, indépendants du personnel directement en charge de l'exploitation de l'INB, dont les compétences, le niveau d'information et la disponibilité leur permettent de :
  - donner un avis technique préalablement à toute modification, matérielle ou documentaire, ou toute intervention pouvant avoir un impact sur la maîtrise du risque de criticité ;
  - formuler auprès d'une personne, ou d'une instance, ayant autorité et identifiée au sein du système de management intégré de l'exploitant, des recommandations techniques en matière de prévention du risque de criticité, y compris dans les situations d'urgence le nécessitant ;
  - contribuer à la formation du personnel ;
  - participer à la prise en compte du retour d'expérience en matière de prévention du risque de criticité ;
- b) l'existence, parmi le personnel en charge de l'exploitation de l'INB, de personnes ayant des compétences dans le domaine de la sûreté-criticité et pouvant assurer, selon leur niveau d'expertise, certaines missions techniques analogues à celles des personnes mentionnées au a) ci-dessus.

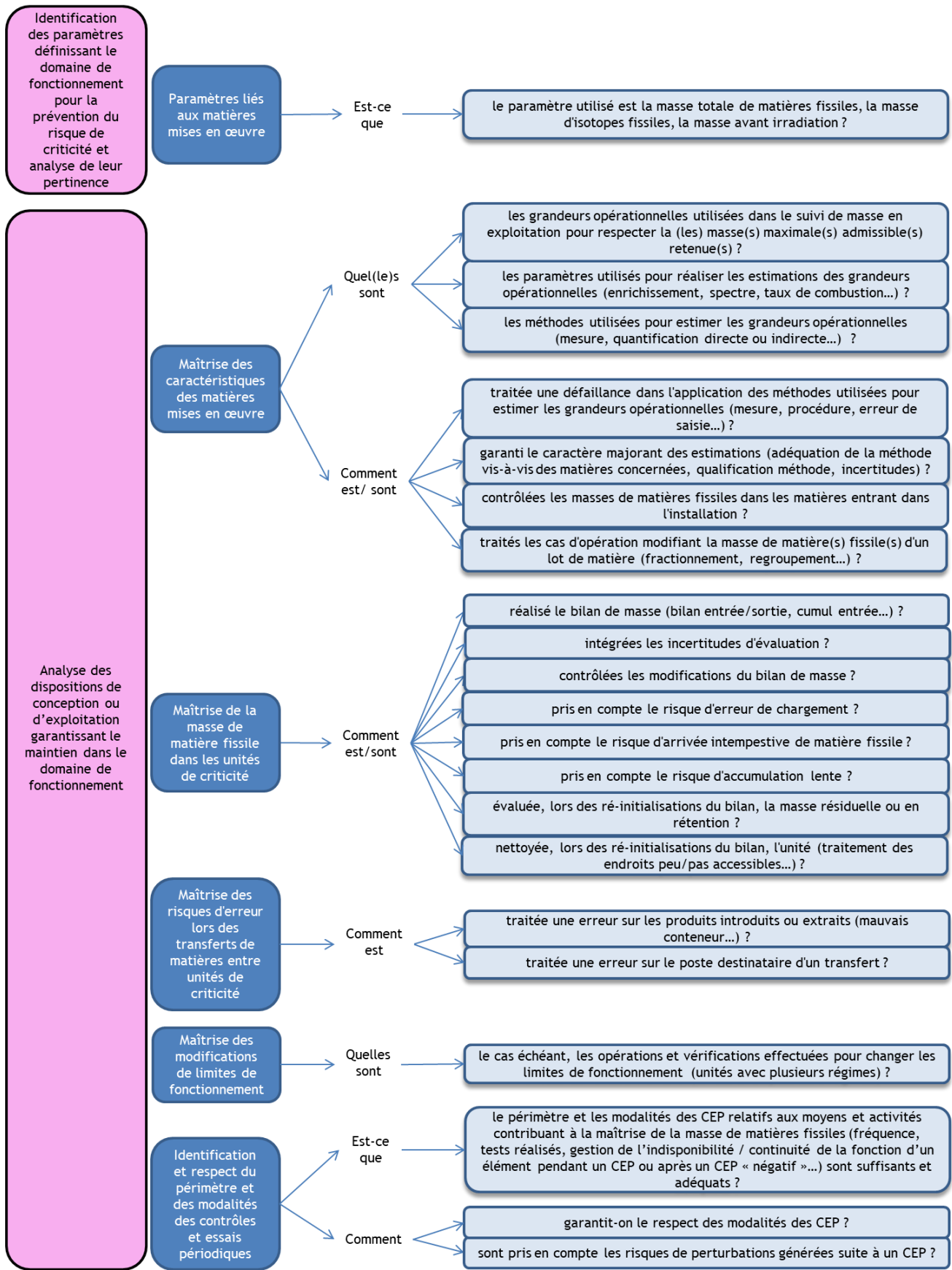
... et contrôlent les activités liées à la maîtrise du risque de criticité.

L'exploitant s'appuie sur les personnes mentionnées [précédemment] pour ses contrôles techniques des AIP contribuant à la maîtrise du risque de criticité.

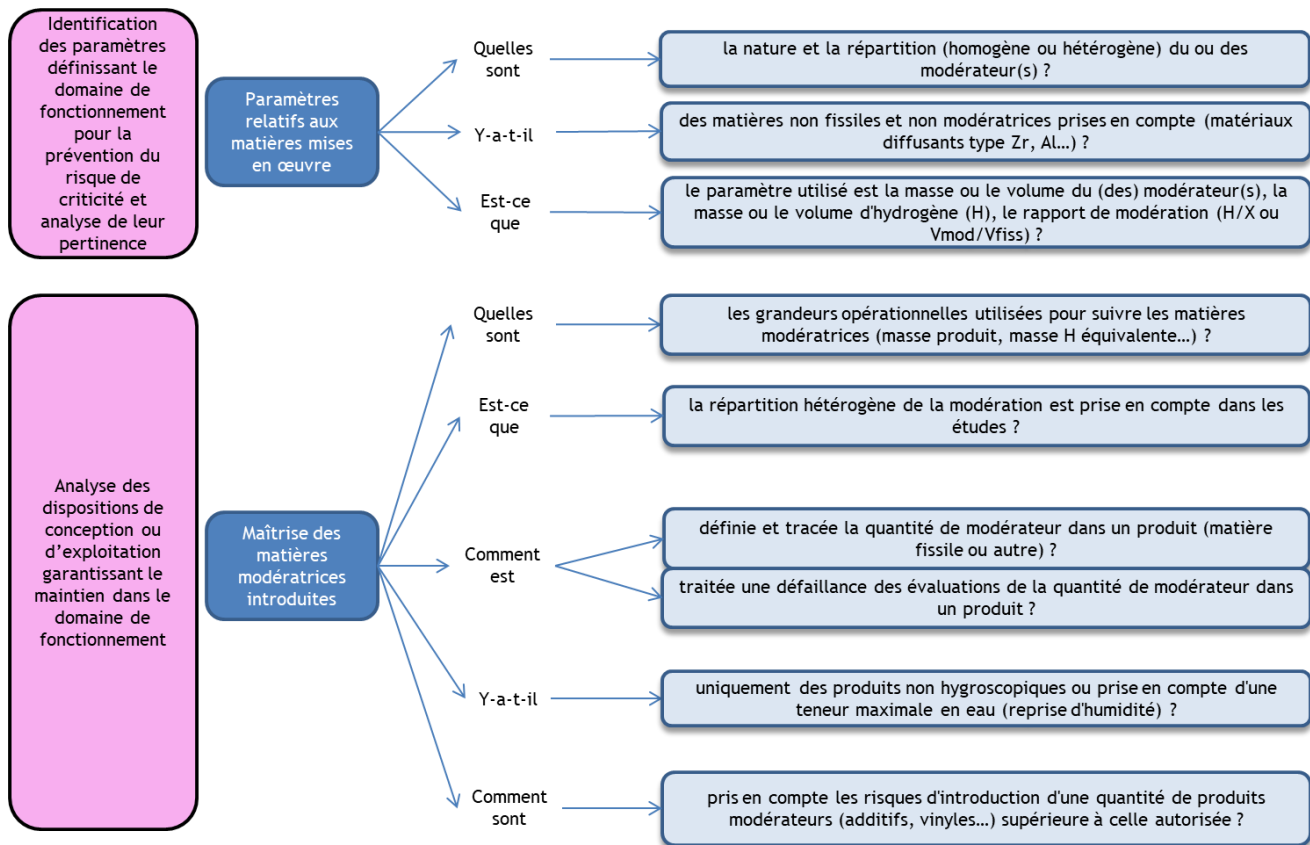




**Mode de contrôle incluant une limitation de la masse de matière fissile**

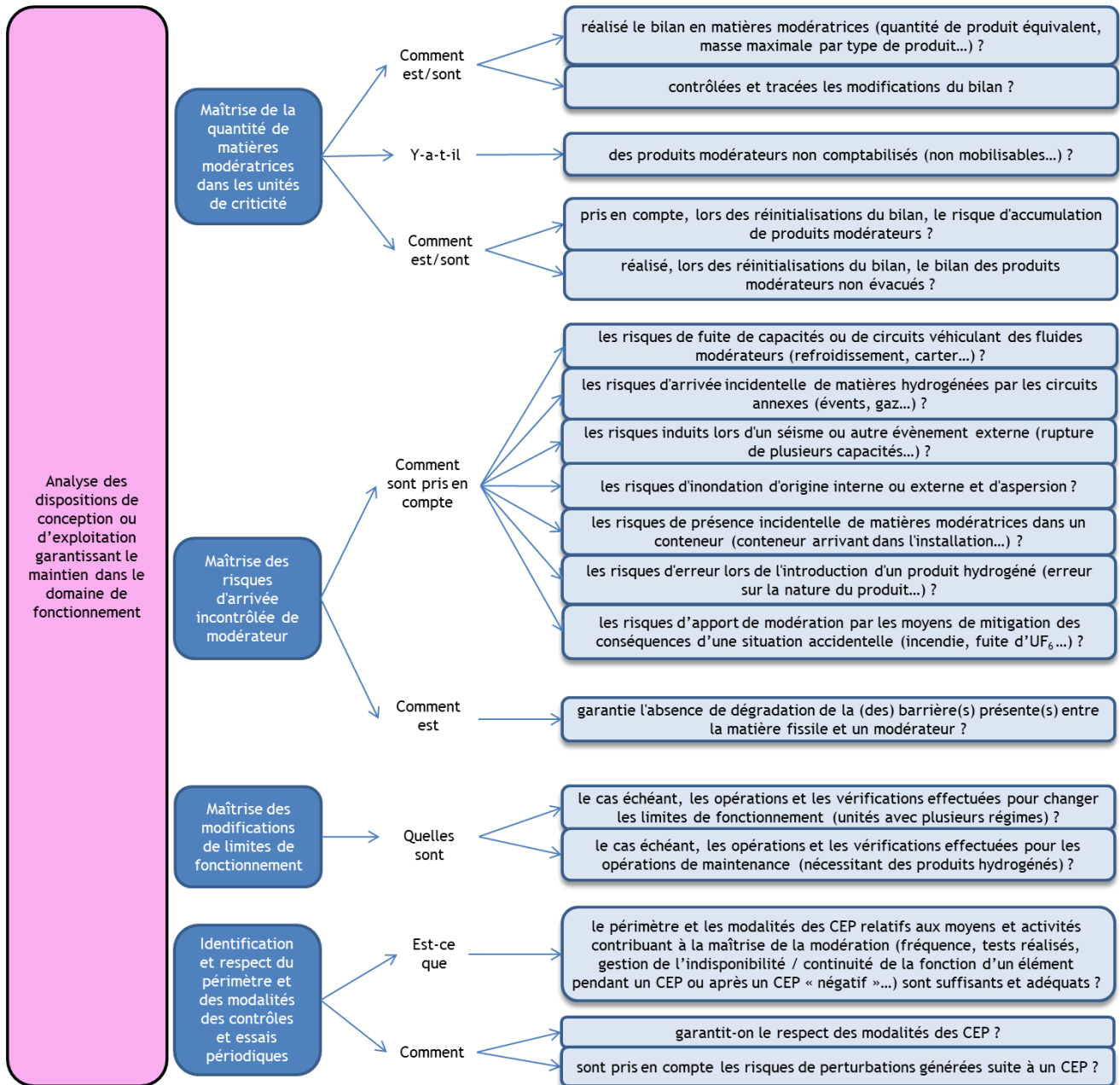


**Mode de contrôle incluant une limitation de la modulation (1/2)**

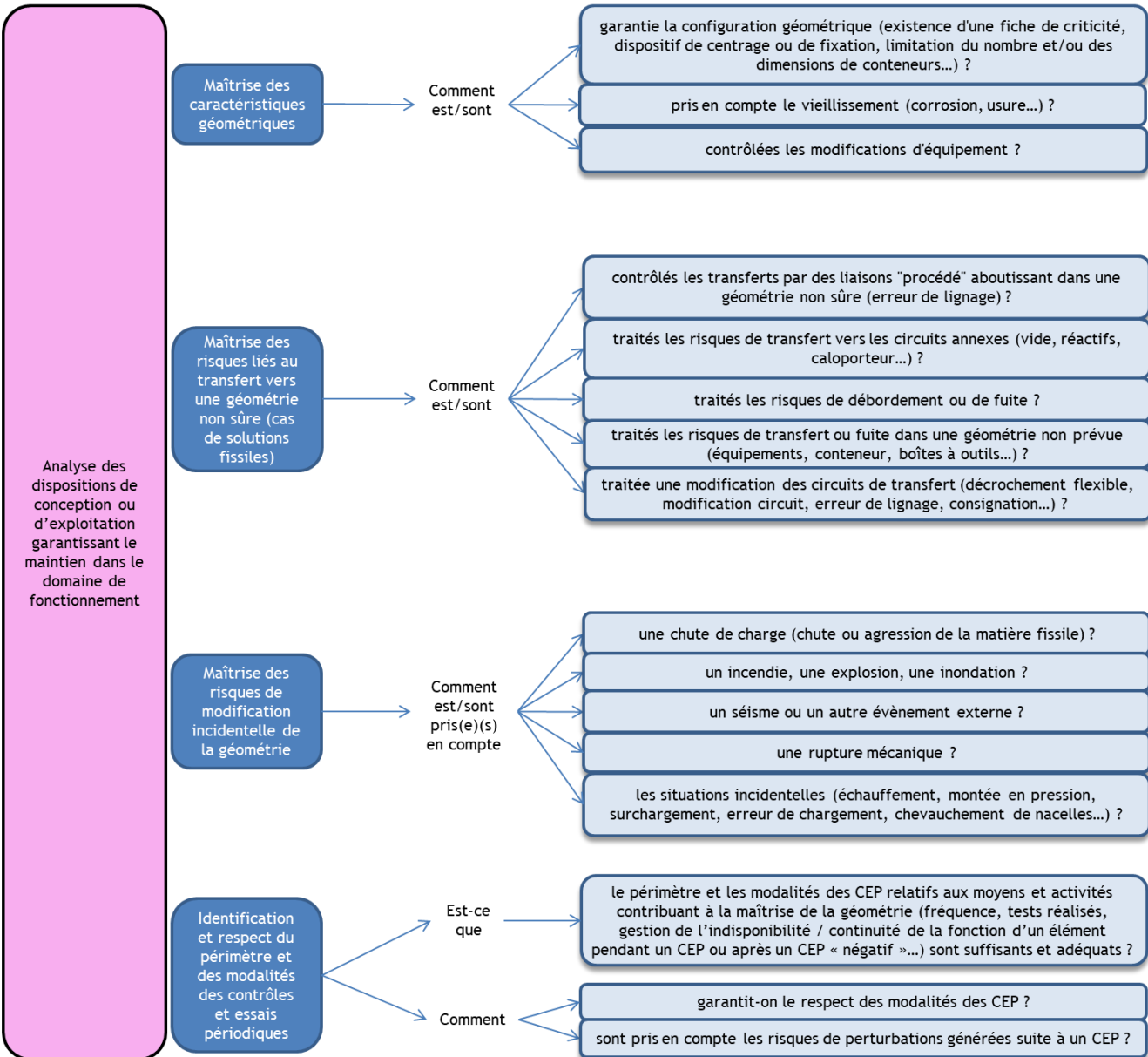
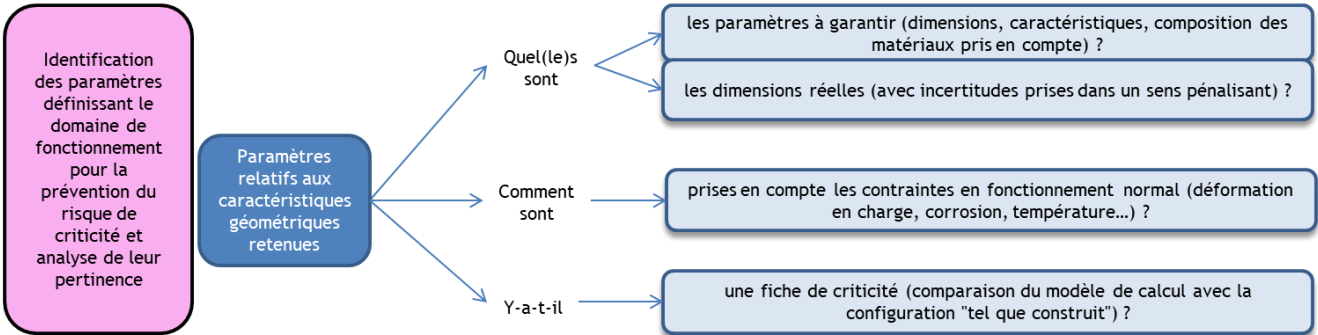




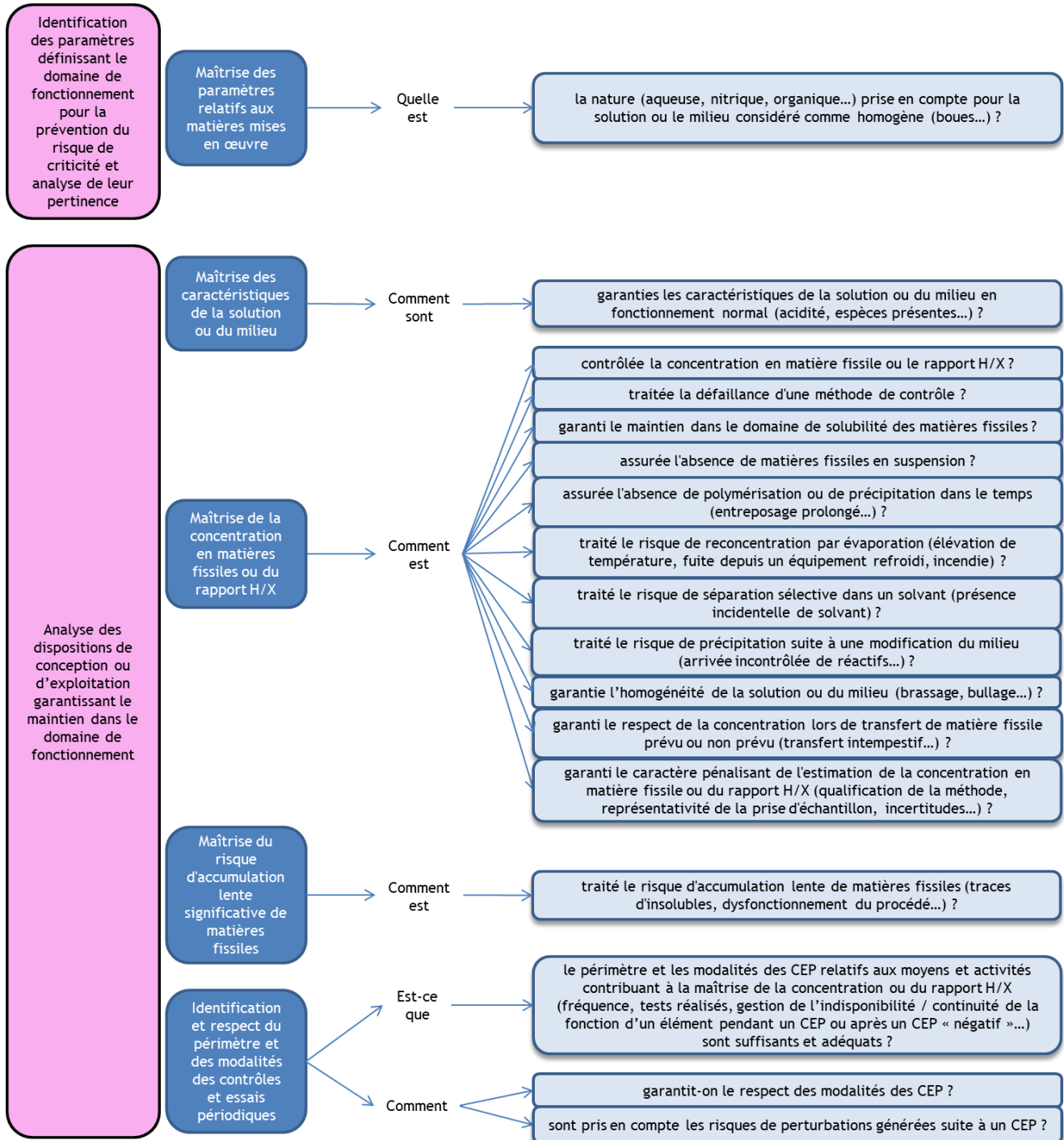
**Mode de contrôle incluant une limitation de la modération (2/2)**



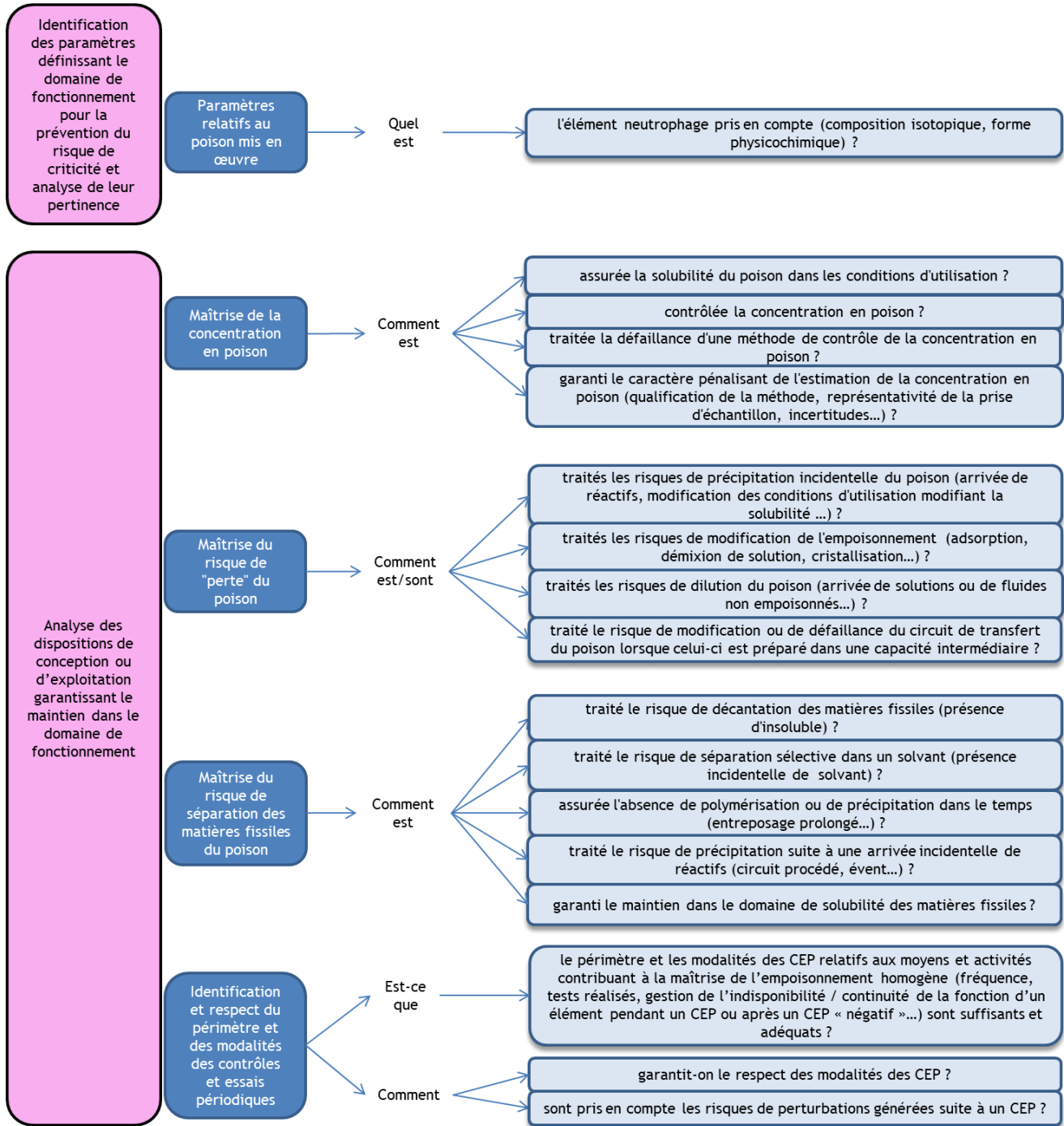
**Mode de contrôle incluant une limitation de la géométrie**



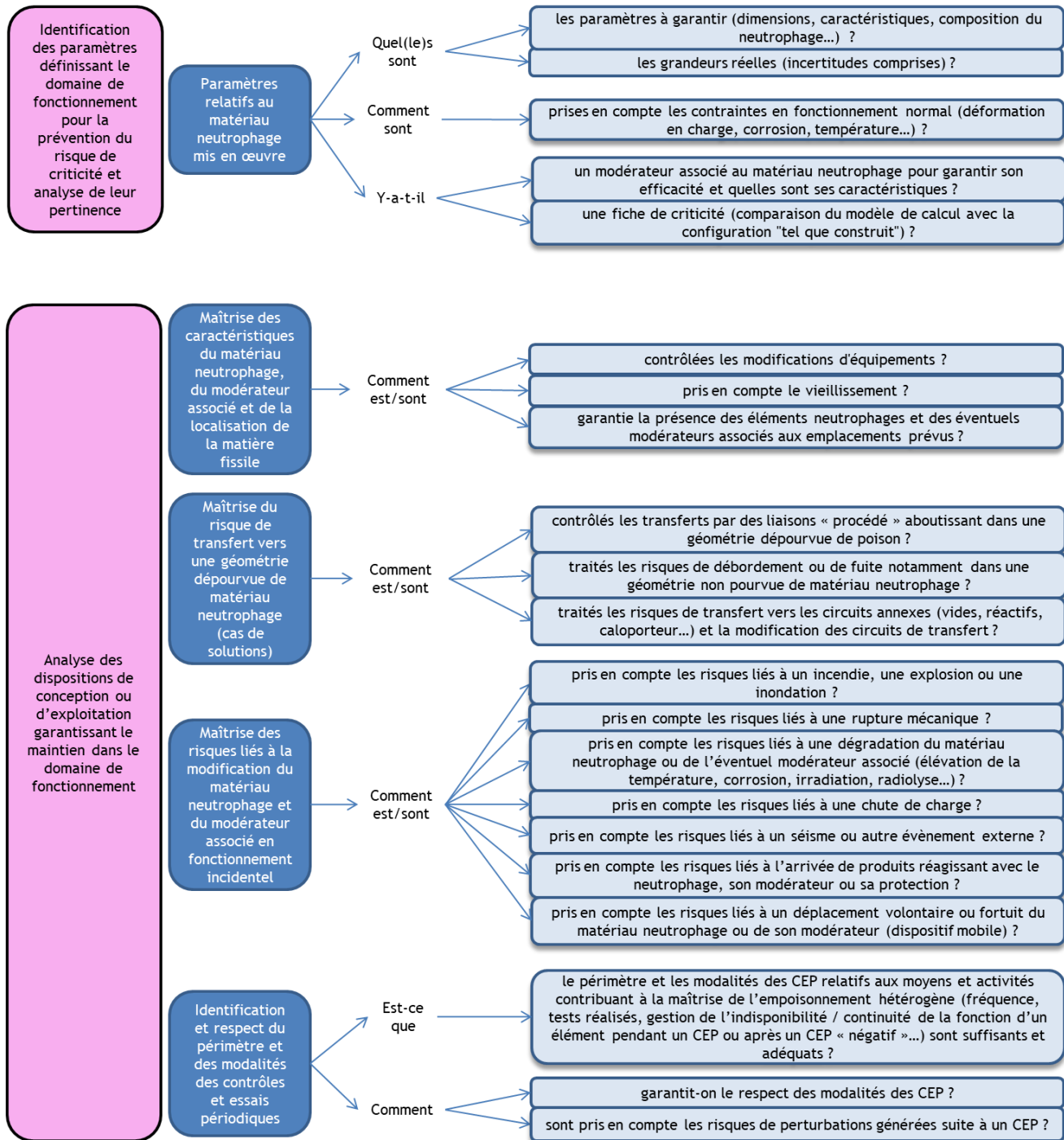
**Mode de contrôle incluant une limitation de la concentration ou du rapport H/X**



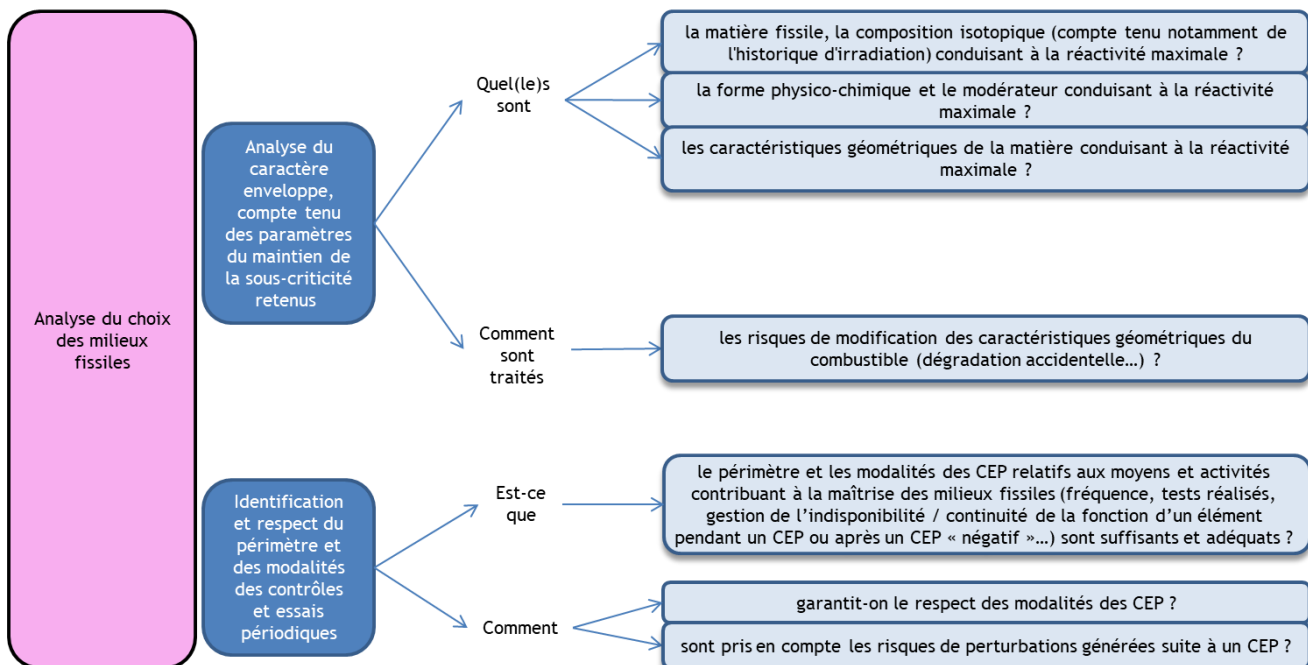
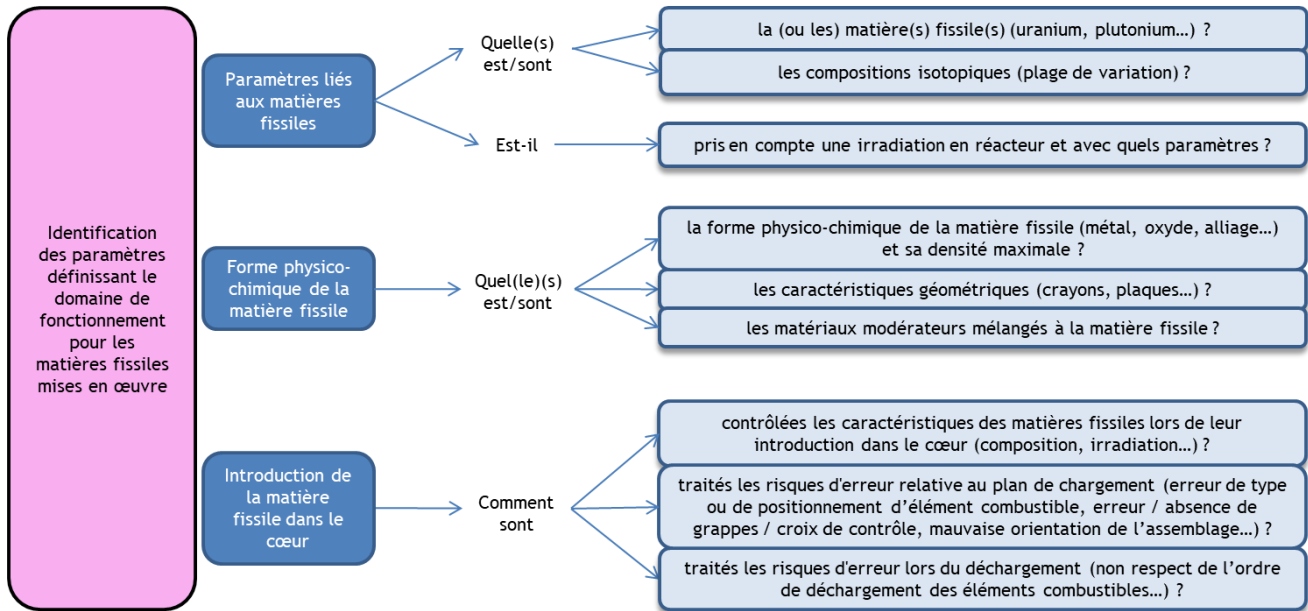
**Mode de contrôle incluant un empoisonnement homogène**



## Mode de contrôle incluant un empoisonnement hétérogène

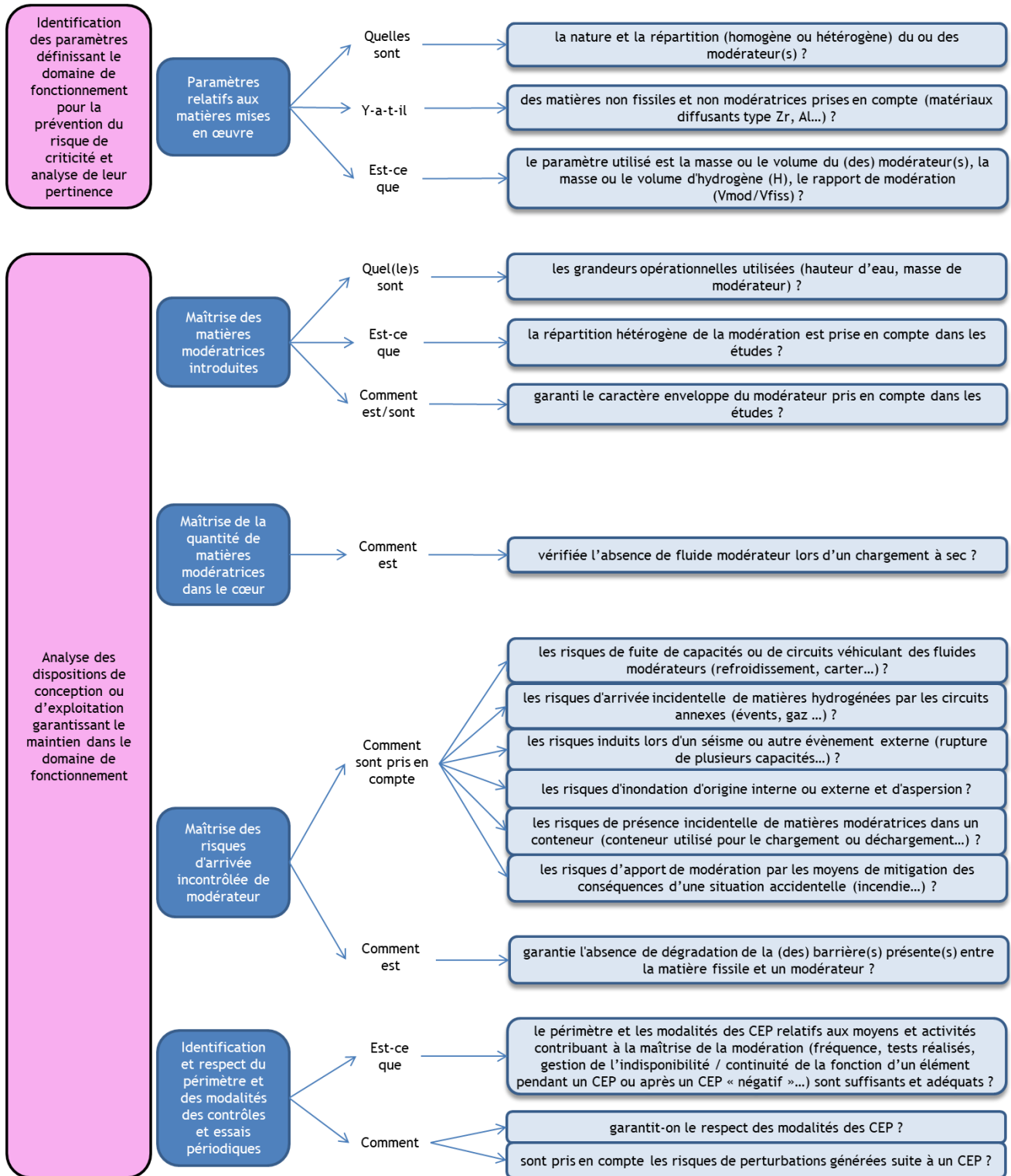


### Cœur de réacteur nucléaire - Milieux fissiles

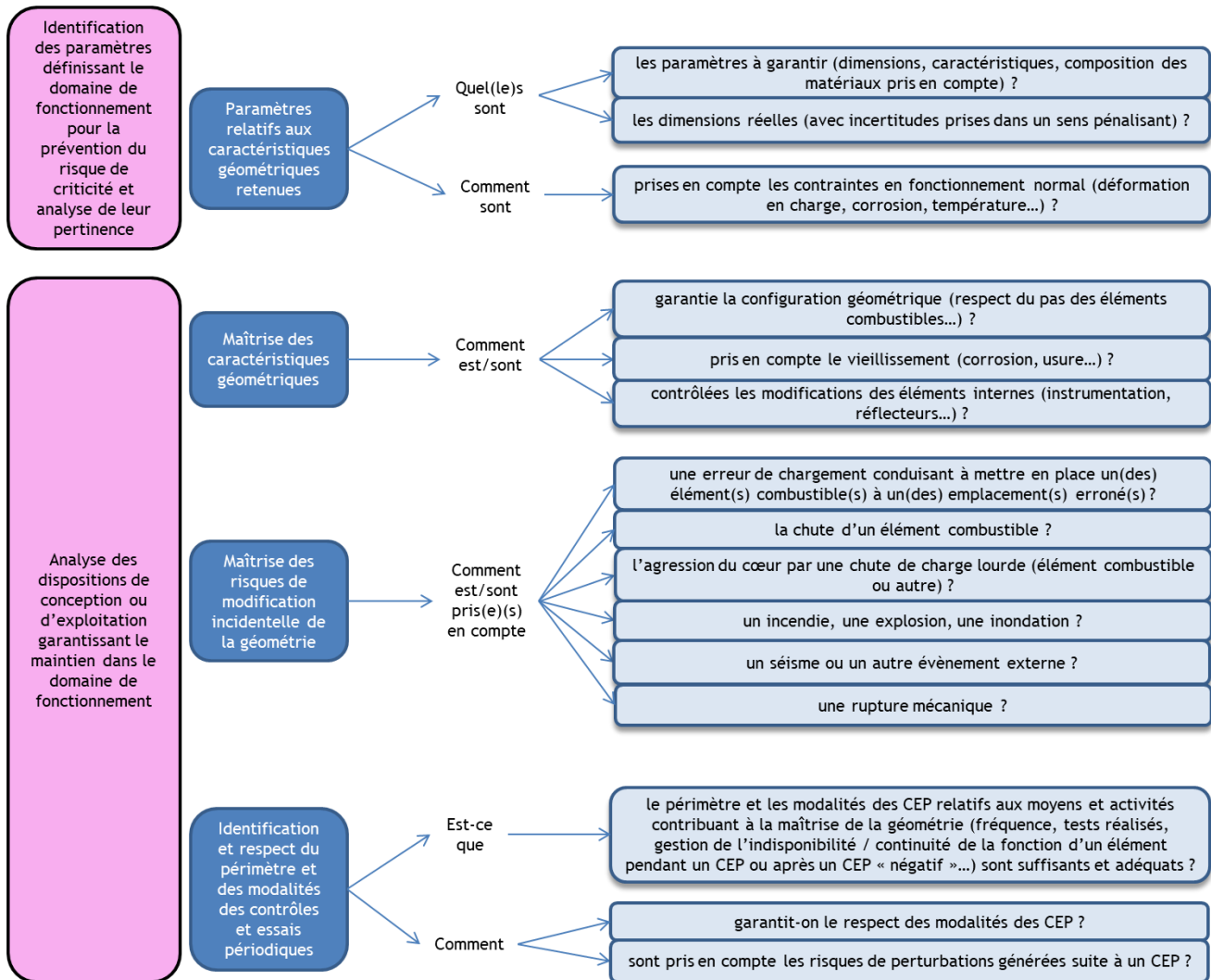




## Cœur de réacteur nucléaire - Maintien de la sous-criticité par une limitation de la modulation

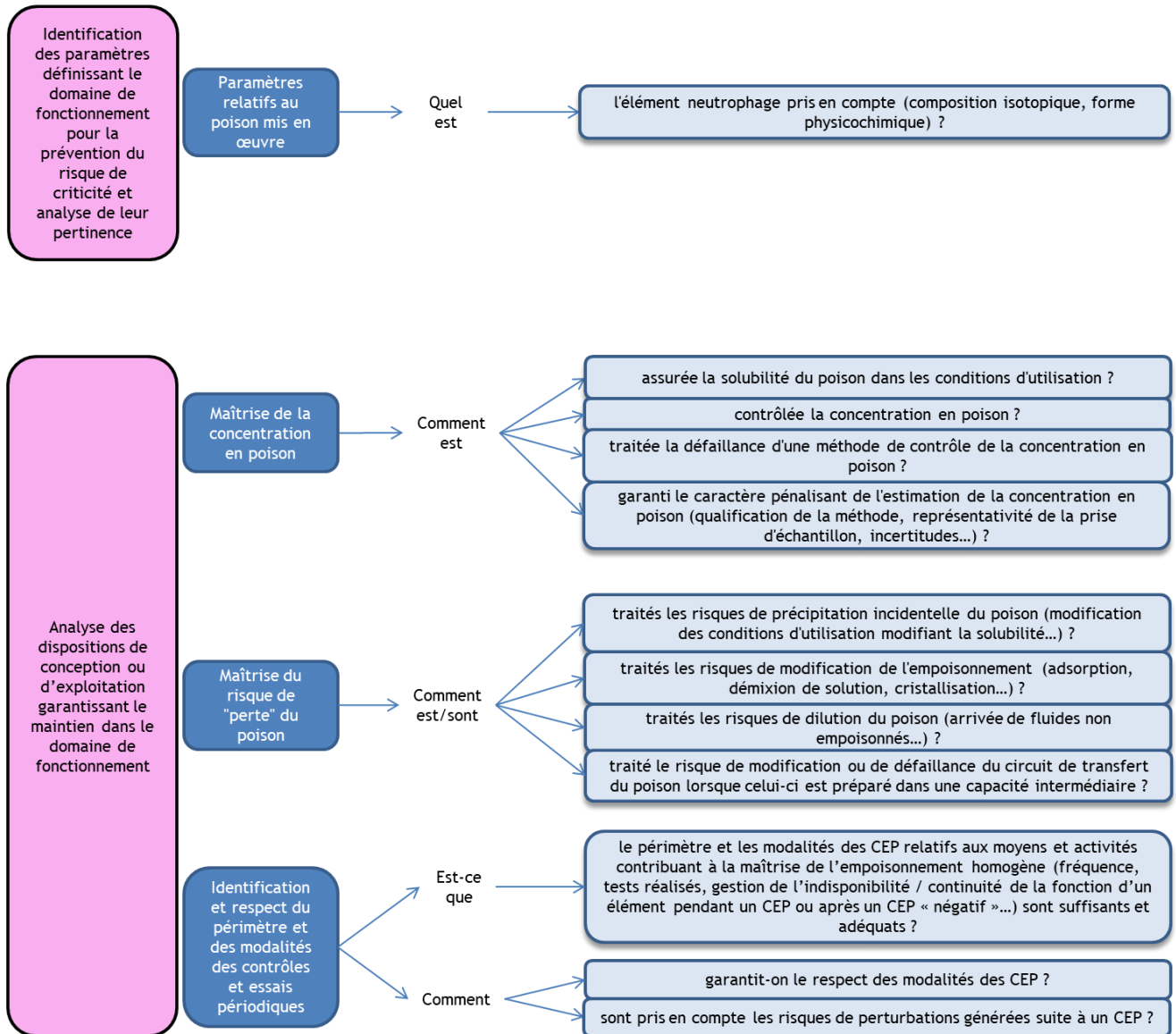


## Cœur de réacteur nucléaire - Maintien de la sous-criticité par une limitation de la géométrie

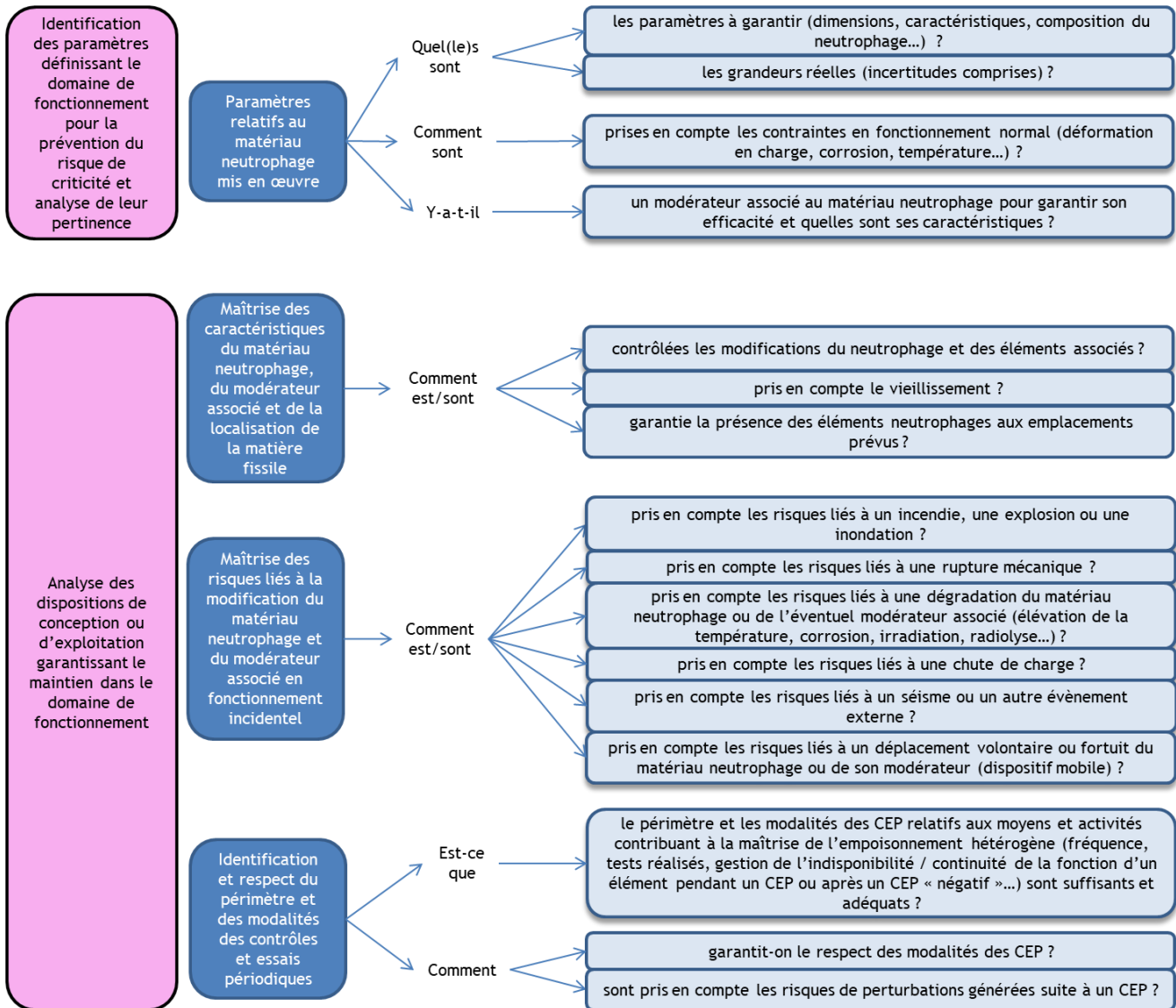




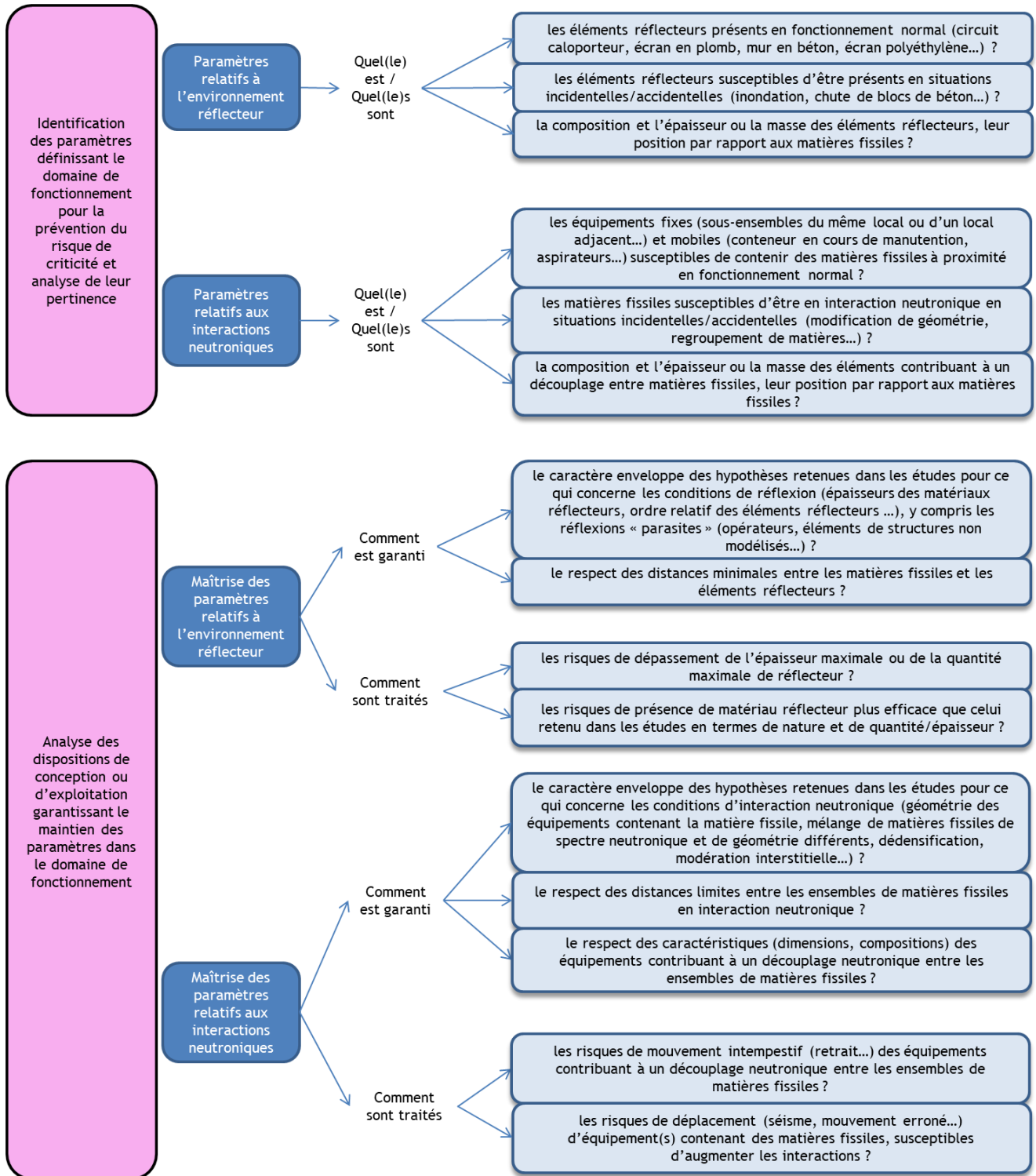
## Cœur de réacteur nucléaire - Maintien de la sous-criticité par un empoisonnement homogène



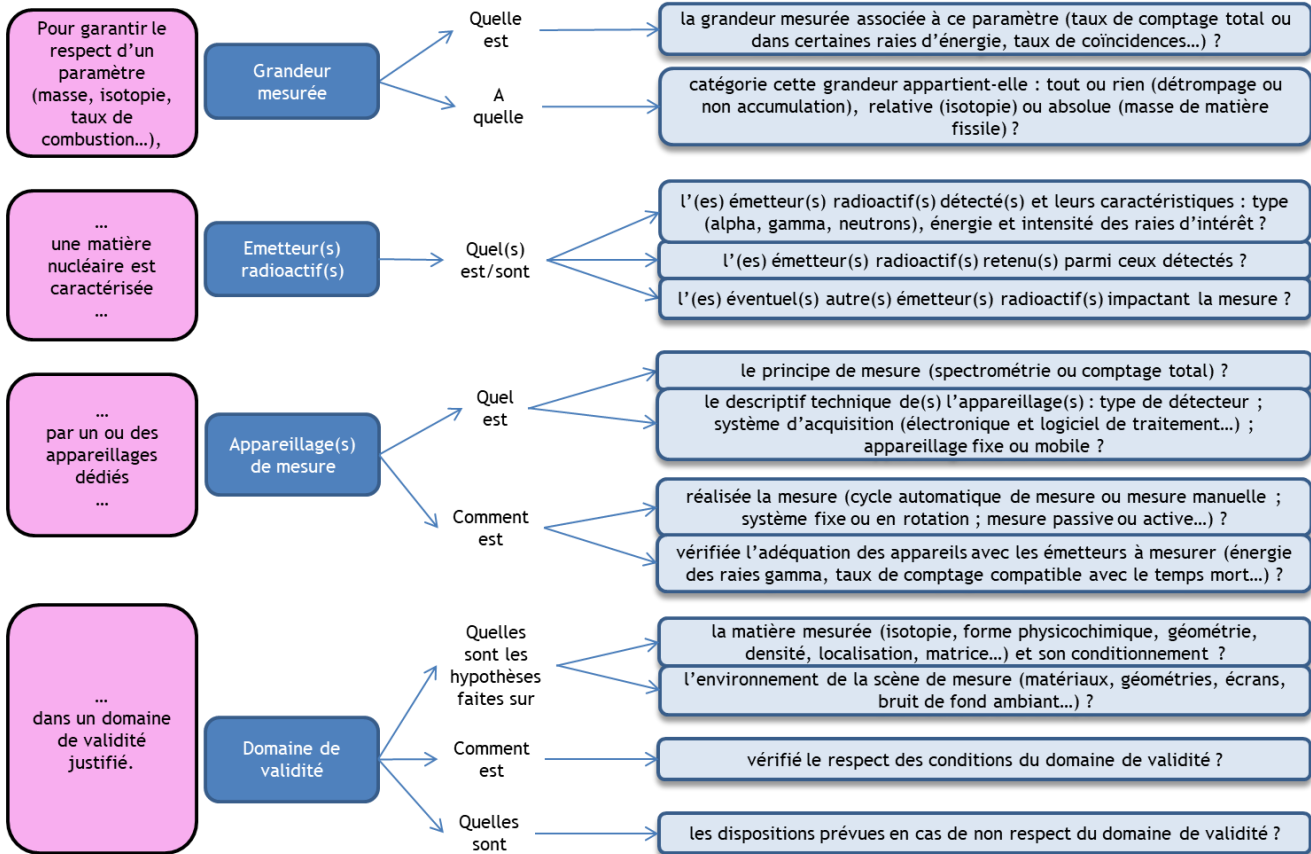
## Cœur de réacteur nucléaire - Maintien de la sous-criticité par un empoisonnement hétérogène



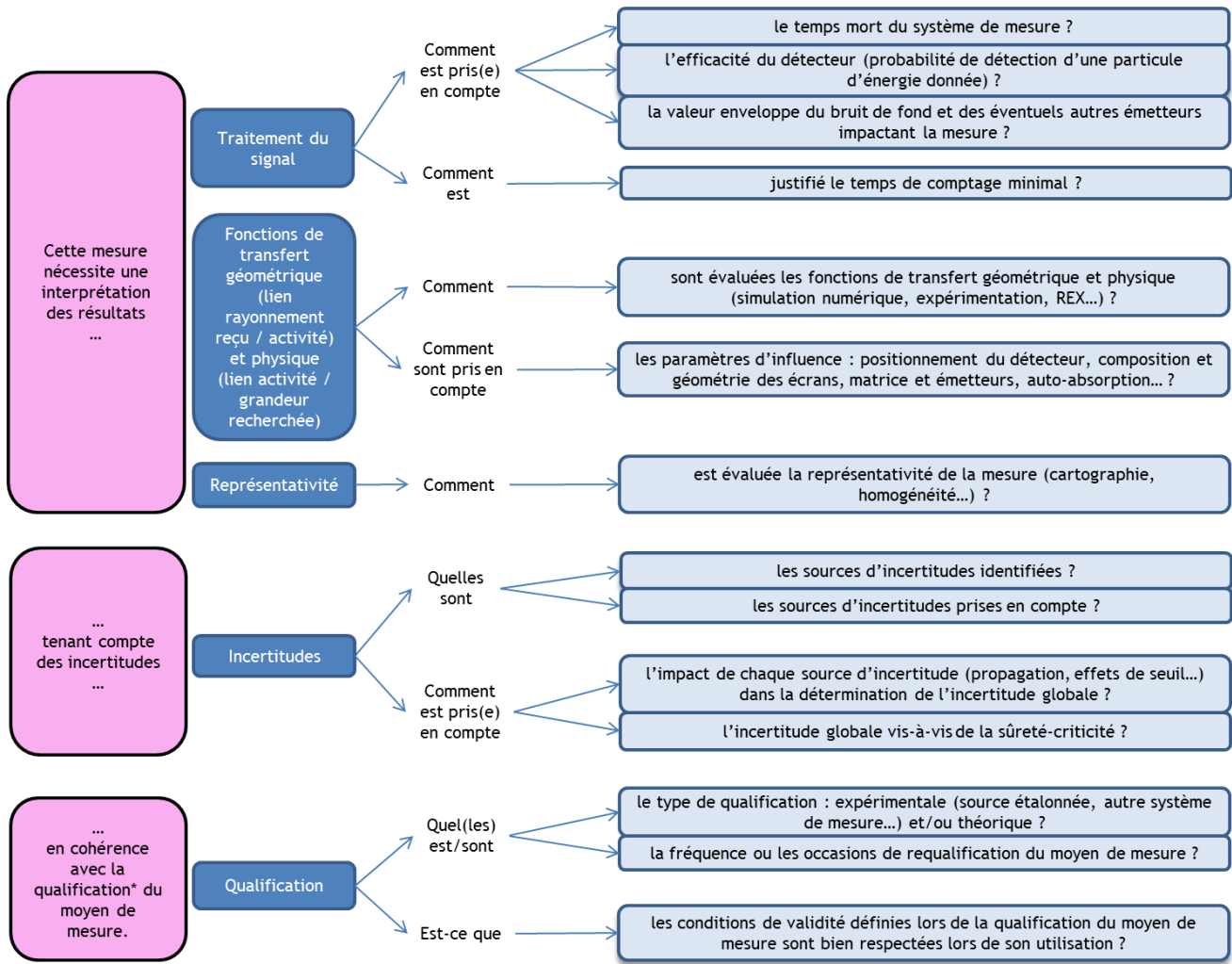
## Réflexions et interactions neutroniques apportées par l'environnement



Mise en œuvre d'un système de mesure nucléaire pour la prévention du risque de criticité (1/2)

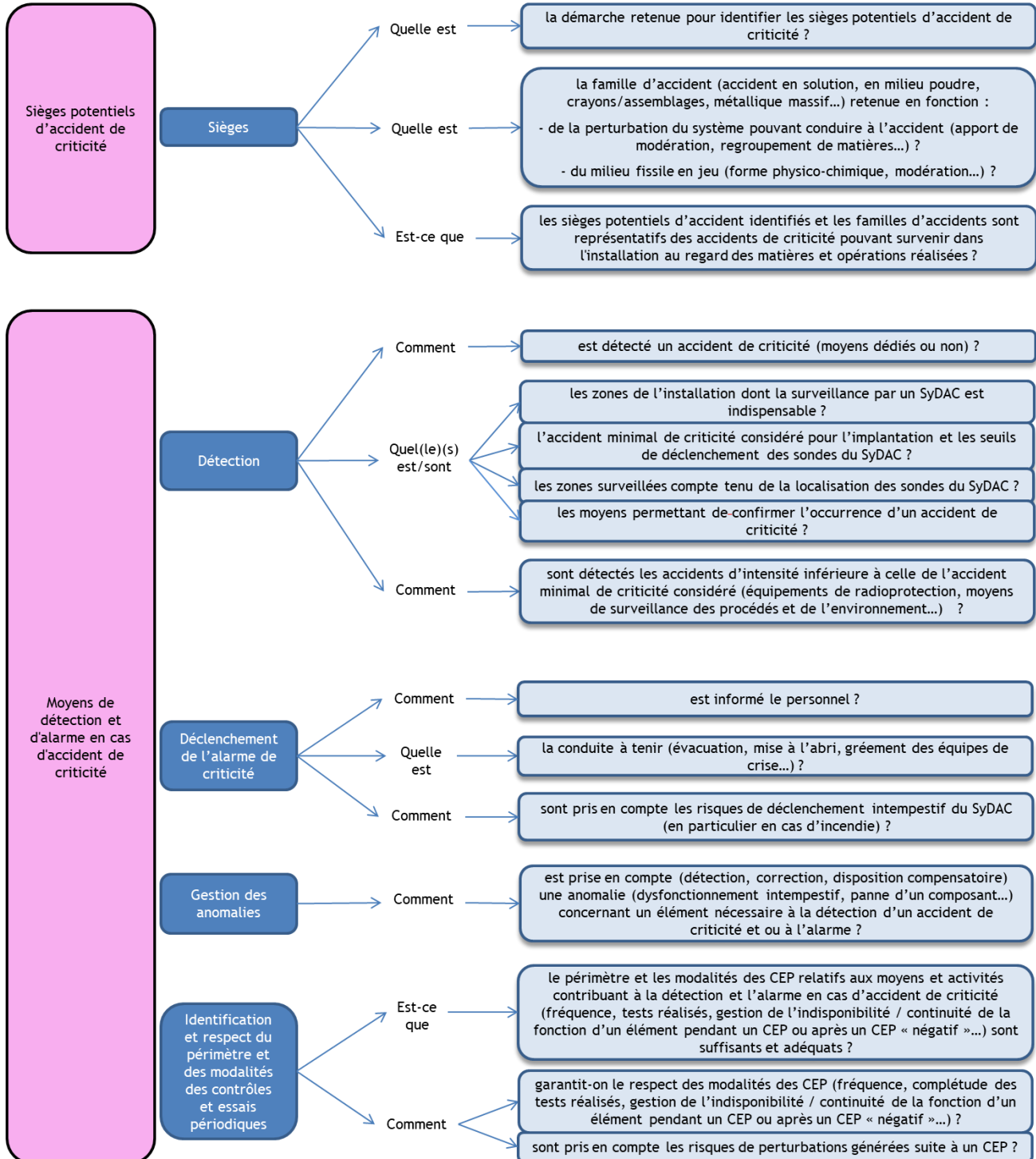


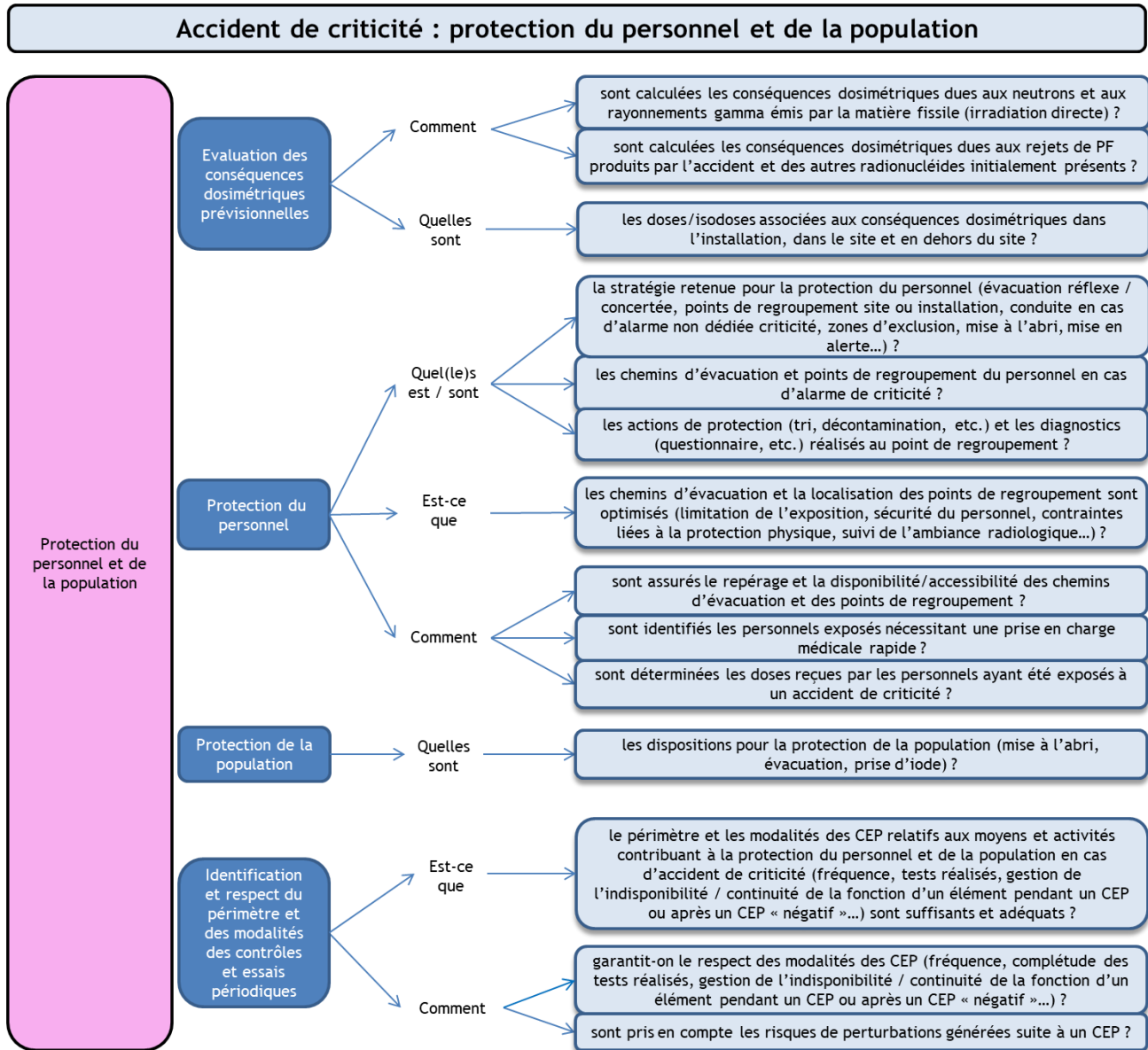
Mise en œuvre d'un système de mesure nucléaire pour la prévention du risque de criticité (2/2)



\* **Qualification** (d'un moyen de mesure) : processus démontrant de façon tangible et documentée qu'un équipement est capable de répondre aux exigences spécifiées (maintenance et étalonnage appropriés...).

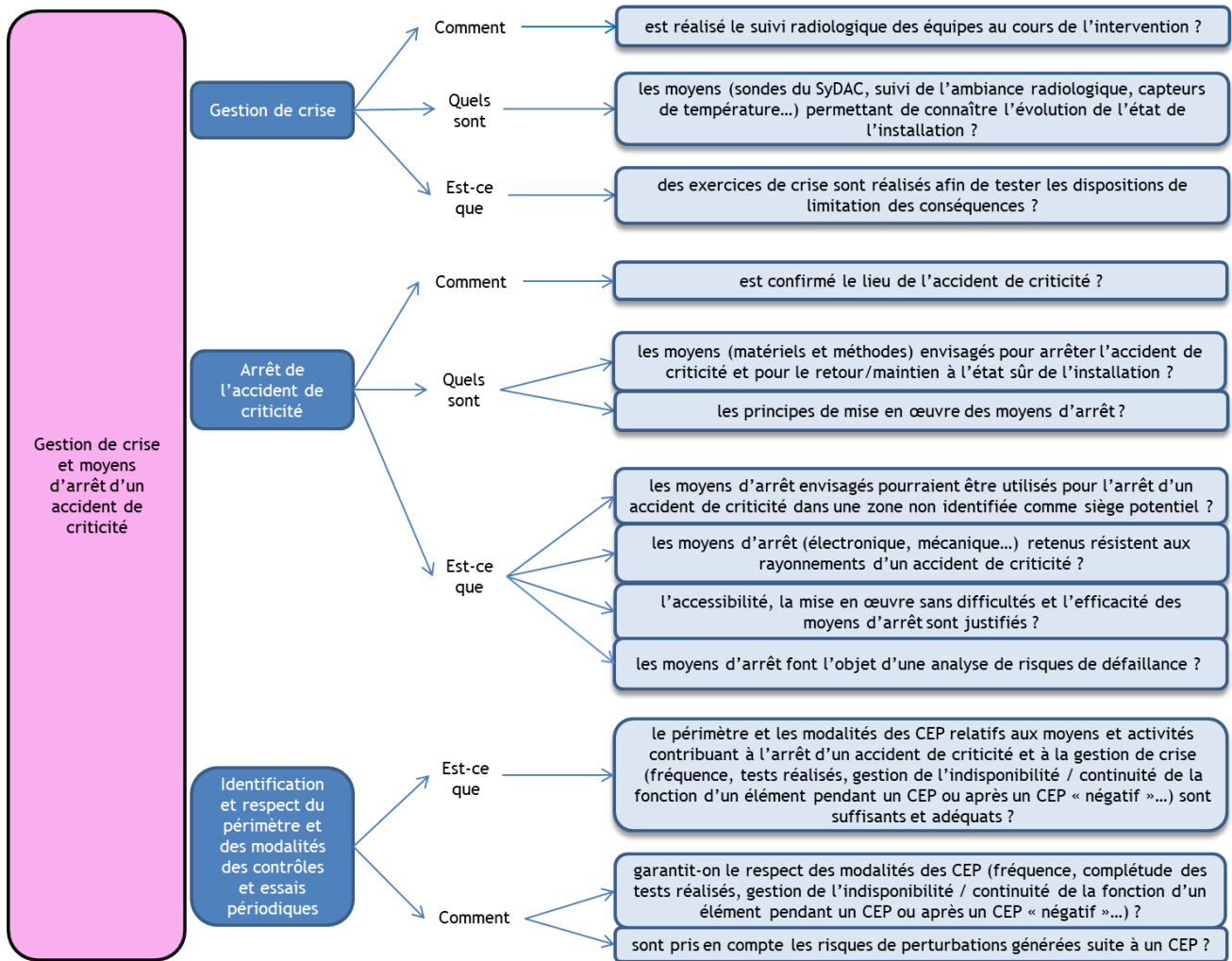
## Accident de criticité : sièges potentiels, détection et alarme







**Accident de criticité : gestion de crise et moyens d'arrêt**







**IRSN**

INSTITUT DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

31 av. de la division Leclerc  
92260 Fontenay-aux-Roses  
RCS Nanterre B 440 546 018

**COURRIER**

B.P 17 - 92260 Fontenay-aux-Roses

**TÉLÉPHONE**

+33 (0)1 58 35 88 88

**SITE INTERNET**

[www.irsn.fr](http://www.irsn.fr)

MEMBRE DE  
**ETSON**