

Sûreté d'un équipement d'expérimentation à usage quasi unique

Safety of an almost single use experimentation equipment

PAROUTY Rémi
CEA
ARPAJON
remi.parouty@cea.fr

LEPINE Paul
CEA
ARPAJON
paul.lepine@cea.fr

Résumé — Dans le cadre du programme simulation permettant de garantir la fiabilité et la sûreté des armes nucléaires françaises, le CEA / DAM réalise en toute sécurité des expériences hydrodynamiques dans des dispositifs de confinement mettant en œuvre de la matière nucléaire au sein de l'installation EPURE. Ces expériences permettent de valider par partie des codes de calcul de simulation sans réaliser d'essais nucléaires conformément au Traité d'Interdiction Complète des Essais nucléaires (TICE). Pour ce type d'installations mettant en œuvre de la matière nucléaire, le cadre de sûreté nucléaire doit être établi et les études de justification doivent être réalisées et indiscutables. Cet article décrit la mise en œuvre spécifique des différentes approches et méthodes d'analyse nécessaires pour démontrer le niveau de sûreté de l'équipement « dispositif de confinement ». Il s'agit notamment de montrer la diversité des analyses nécessaires, les choix d'adaptation réalisés et les marges volontairement prises.

Mots-clefs — *sûreté nucléaire, sûreté « théorique », sûreté « pratique », dispositif d'expérimentation, réutilisation*

Abstract — Within the « simulation program » context that aims to underwrite the reliability and safety of the French nuclear warheads, the CEA's military applications division conducts, in a safe and secure manner, explosively driven hydrodynamic trials into a containment vessel implementing nuclear material inside the EPURE facility. The measures and images of those trials are used to improve physics modeling which numerically simulate the nuclear weapon's materials implosions in compliance with the Comprehensive Test Ban Treaty (CTBT). For this type of installations implementing nuclear matter, the safety must be defined then unquestionably proved. This article describes the specific implementation of various analysis approaches and methods needed to demonstrate the safety level of the « containment vessel » equipment. The purpose of this paper is to point out the variety of applied analysis, choices of method's adaptation and intentionally taken margins.

I. CONTEXTE

La Direction des Applications Militaires (DAM) du CEA a pour mission de concevoir, de fabriquer, de maintenir en condition opérationnelle puis de démanteler les têtes nucléaires qui équipent les forces océaniques et aéroportées françaises. La fiabilité et la sûreté des têtes nucléaires sont désormais garanties sans essais nucléaires nouveaux, grâce au programme Simulation lancé en 1996. Il repose sur la modélisation des phénomènes physiques décrivant le fonctionnement des armes, la résolution des équations grâce à des supercalculateurs et leur validation expérimentale sur les grandes installations EPURE et le laser Mégajoule (LMJ).

EPURE est une installation de recherche franco-britannique située sur le site du CEA/DAM à Valduc. EPURE permet à la France et au Royaume-Uni de disposer d'une installation utilisant la radiographie X éclair pour réaliser des expériences d'hydrodynamique (illustrations en Fig. 1).

L'installation EPURE a été mise en service en octobre 2014 avec un axe radiographique et comprend désormais trois axes de radiographie. C'est actuellement la seule installation au monde capable de réaliser ce type d'expériences équipée de trois axes de radiographie.

Les images de radiographie permettent par confrontation aux calculs d'optimiser les modèles de physique utilisés pour simuler numériquement une partie du fonctionnement des armes.



33

Fig. 1. Représentation de l'installation EPURE (configuration 1 axe)

34

Les expériences d'hydrodynamique permettent d'étudier la matière soumise à des vitesses de déformation et de compression extrêmes (quelques kilomètres par seconde) grâce à la mise en œuvre d'explosifs. Pendant le phénomène utile de l'expérience, dont l'ordre de grandeur de durée est de quelques dizaines de microsecondes, les matériaux métalliques présentent des comportements spécifiques que l'on cherche à observer par ces expériences. Le comportement global, mécanique et vibratoire, de l'expérience est quant à lui sur un ordre de grandeur de dizaines de millisecondes. Ces multiples phénomènes physiques à différentes temporalités, mais particulièrement rapides, confèrent un aspect spécifique au contexte dans lequel se place cet article.

40

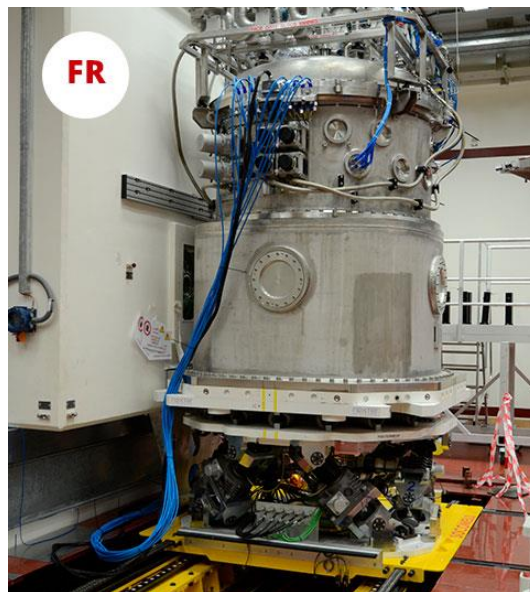
Pour protéger les installations, l'expérience d'hydrodynamique est confinée dans un « dispositif de confinement » (DCo) qui permet également de contenir les produits de détonation. En contrepartie, le DCo doit permettre la prise de radiographies et donc laisser passer suffisamment de rayons X dans les axes d'observation radiographiques.

43

Quand les expériences mettent en œuvre de la matière nucléaire, le DCo assure également le confinement de cette matière nucléaire et les expériences sont donc réalisées en toute sûreté et sécurité au sein de l'installation EPURE. Des analyses de sûreté nucléaire sont par contre nécessaires pour autoriser le fonctionnement de l'installation.

46

Voici l'illustration des premiers DCo utilisés dans l'installation EPURE :



47

48

Fig. 2. DCo (configuration 1 axe)

49

La suite de cet article concerne les analyses de sûreté des dispositifs de confinement français conçus et réalisés par le CEA / DAM.

51

La programmation d'expériences avec DCo est de quelques expériences par an avec un étalement sur plusieurs dizaines d'années. Ainsi, la fabrication des DCo se fait ponctuellement en petite série, voire à l'unité pour les « grosses » pièces, mais doit être assurée sur le long terme. De plus, les expériences mettent généralement en œuvre des matières difficilement retraitables ; un DCo neuf est donc utilisé pour pratiquement chaque expérience. Toutefois, lorsque l'assainissement d'un DCo est possible après expérience, la réutilisation de certaines pièces du DCo est envisageable. La terminologie « à usage quasi unique » découle de cette situation.

57

58

II. DEFIS A RELEVER

59 L'installation EPURE est la première installation de réalisation d'expériences d'hydrodynamique avec radiographie multi-
60 axe mettant en œuvre des édifices expérimentaux contenant des matières nucléaires.

61 La sûreté nucléaire doit alors être prouvée et maîtrisée. L'aspect « nouveauté » implique donc une innovation dans la
62 conception de cette installation en cohérence avec la sûreté à appliquer. La méthode de démonstration de la sûreté nucléaire est
63 à construire et la justification associée doit être indiscutable. Trois questions se posent alors :

- 64 • Quel(s) référentiel(s) faut-il appliquer ?
- 65 • A quel périmètre la sûreté nucléaire doit-elle s'appliquer ?
- 66 • Quels outils faut-il utiliser ?

67 Au-delà de ces questions auxquelles cet article se propose de répondre, un principe général de conception et de justification
68 s'est imposé au CEA vis-à-vis de la « nouveauté » de l'installation. Il s'agit de gérer les incertitudes en appliquant des marges et
69 des conservatismes. Sans tomber dans le surdimensionnement, il s'agit de prendre les hypothèses les plus majorantes acceptables
70 pour s'assurer que le cadre de fonctionnement nominal ne dépasse pas les hypothèses de conception et de justification.

71

III. REFERENTIEL ET PERIMETRE SURETE

72 A. Cadre de mise en œuvre de la sûreté

73 Mettant en œuvre des matières nucléaires, l'installation EPURE (incluant les DCo) fait l'objet d'une analyse de sûreté
74 nucléaire soumise au Délégué à la Sûreté Nucléaire et à la radioprotection pour les installations et activités intéressant la Défense
75 (DSND) conformément à l'arrêté IANID.

76 Plusieurs cadres réglementaires de sûreté nucléaire existant au CEA s'appliquent à l'installation EPURE :

- 77 • Un cadre dit « installation » concernant les activités générales d'exploitation de l'installation.
- 78 • Un cadre dit « tête nucléaire » dédié aux opérations de montage de l'édifice expérimental.
- 79 • Un cadre dit « expérience » s'inspirant des rapports de sûreté « armes » pour le risque de rejet accidentel.

80 Ces trois cadres présentent les objectifs de sûreté de façon légèrement différentes mais sont cohérents entre eux. L'analyse
81 de sûreté globale de l'installation EPURE est répartie en plusieurs tomes en fonction globalement des trois cadres réglementaires
82 cités ci-dessus. Le DCo fait l'objet d'un tome spécifique appliquant le cadre « expérience ».

83 Les objectifs de sûreté sont issus des cadres réglementaires cités ci-dessus et sont particulièrement élevés. Pour les DCo,
84 l'objectif retenu est une probabilité objective de rejet de matière nucléaire dans l'environnement de l'ordre de 10^{-7} par expérience.
85 Cette valeur est directement issue du cadre réglementaire « armes » et validée par le DSND.

86 La structuration du dossier sûreté est nécessairement adaptée au cas des DCo car leur fonctionnement de base est
87 spécifiquement différent de celui d'une arme ; et, la complexité de l'équipement et son cycle de vie ne nécessitent pas le
88 déploiement de l'ensemble du référentiel considéré.

89 B. Périmètre de la sûreté

90 Le choix français de principe de conception des DCo actuels est la « double enveloppe » (Fig. 3). Une cuve principale enferme
91 l'édifice expérimenté et confine les effets de l'explosion. Cette cuve est à l'intérieur d'une enceinte permettant de reprendre les
92 éventuelles fuites, naturelles ou non, issues de la cuve. A noter que le bâtiment constitue également une barrière dans certains
93 scénarios accidentels.

94 Le périmètre d'analyse suivant et la production documentaire associée sont mis en œuvre pour une gamme de DCo :

- 95 • La « sûreté théorique » permet de justifier le niveau de conception des DCo. Elle fait l'objet d'une Analyse
96 Quantitative de Sûreté (AQS) de conception rassemblant l'ensemble des justifications scientifiques de la conception
97 du DCo et d'un Rapport de Sûreté (RPS) justifiant le respect des objectifs de sûreté. Ce RPS fige notamment la
98 conception retenue et détermine les conditions autorisées du fonctionnement normal d'une expérience en DCo. Ces
99 deux documents déterminent également les paramètres de sûreté.
- 100 • La « sûreté pratique » permet de justifier le niveau de réalisation des DCo. Elle fait l'objet d'une AQS de réalisation
101 justifiant la maîtrise de chaque paramètre de sûreté dans les phases de fabrication, montage et contrôle à un niveau
102 cohérent avec la sûreté théorique. Ce volet est assez commun dans l'industrie de défense pour maîtriser les « petites
103 séries » de production et s'appuie sur la norme NF C20-311.
- 104 • L'« analyse de réutilisation » détermine les pièces du DCo qui sont potentiellement réutilisables, les conditions dans
105 lesquelles elles sont réutilisables et les critères à appliquer pour justifier qu'elles sont réellement réutilisables. Ce
106 volet répond spécifiquement à l'aspect « utilisation quasi unique » des DCo, il pourrait s'apparenter à une « analyse
107 maintenance ».

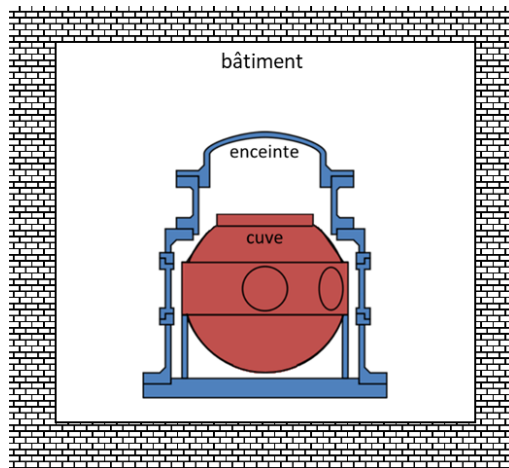


Fig. 3. Principe « double enveloppe » du DCo

En complément et en réponse à ce dossier documentaire :

- Pour chaque DCo réalisé, les documents probatoires considérés par la sûreté pratique sont recueillis, vérifiés et enregistrés.
- Chaque expérience prévue fait l'objet d'une analyse justifiant que le domaine de fonctionnement normal est respecté.
- Pour chaque DCo devant être réutilisé, les résultats de contrôles et d'analyses attendus sont assemblés pour justifier sa réutilisation.

IV. SURETE THEORIQUE

A. Principes

L'analyse de la sûreté de conception (ou « sûreté théorique ») permet de montrer que le produit tel que défini répond au besoin sûreté durant la totalité de sa durée d'emploi. Elle permet de tracer les liens entre les défaillances redoutées, les fonctions de sûreté et les exigences de sûreté du produit.

Tel que dit précédemment, par application du cadre de sûreté choisi, l'événement redouté général est le rejet de matière nucléaire à l'extérieur du bâtiment EPURE avec un objectif de sûreté de 10^{-7} par expérience.

Par application des guides internes CEA concernant la sûreté nucléaire (voir bibliographie), une analyse préliminaire a permis de définir six scénarios de défaillances génériques correspondant à différents phénomènes de « perte du confinement » (fuites, rupture brutale, vibrations, ...). Ces scénarios sont suffisamment différents et indépendants entre eux pour ne pas se cumuler et l'objectif de 10^{-7} par expérience est appliqué à chacun d'eux.

Un DCo est exploité au sein de l'installation EPURE de façon cohérente avec l'installation elle-même. Notamment, au moment de l'expérience, le DCo fait partie intégrante du bâtiment (il est notamment connecté à certains circuits du bâtiment) avec l'exploitation du système global par les opérateurs. Ainsi, l'analyse sûreté des DCo considère les servitudes du bâtiment auxquelles le DCo est connecté (contrôle / commande, énergies, circuits de traitement des gaz, ...) et toutes les procédures associées.

Un DCo est un système relativement complexe. La structure générale est un assemblage de pièces métalliques (« mécaniques ») plus ou moins massives de différents matériaux. Les systèmes supports et de servitude sont de type « circuits / tuyauterie » et sont essentiellement constitués d'équipements de robinetterie, de filtres et de capteurs. Plusieurs systèmes de sécurité contrôlent les états autorisés du DCo.

Ainsi, si chaque scénario fait l'objet d'une analyse (classique) par arbre de défaillance, permettant de déterminer toutes les défaillances élémentaires contributrices (événements de base), la quantification des événements de base s'appuie sur différentes méthodes :

- La justification des pièces mécaniques se fait selon la méthode « résistance / contrainte » qui appelle ensuite des méthodes d'évaluation numériques et expérimentales.
- Les circuits sont analysés jusqu'aux modes de défaillance des différents composants par arbres de défaillances et la quantification des événements de base s'appuie sur les données constructeurs, les bases de données de fiabilité et les contrôles réalisés.
- La partie procédure fait l'objet d'une approche « Facteurs Organisationnels et Humain » (FOH).

De plus, une analyse des modes communs est réalisée aussi bien sur les défaillances techniques que sur les actions humaines afin de prendre en compte les éventuelles dépendances entre les barrières considérées.

148 Enfin, comme le but est de prouver l'atteinte de l'objectif mais pas d'évaluer la performance réelle du système, l'évaluation
149 des arbres de défaillances est réalisée avec les allocations au « juste nécessaire ». Ainsi, pour certains événements de base, seule
150 une partie des justifications existantes est retenue pour valider le « juste nécessaire ». Cela permet notamment de réaliser ensuite
151 l'exercice de sûreté pratique au juste besoin sans sur qualité.

152 C'est donc tout un panel de méthodes et outils de maîtrise des risques et plus généralement d'ingénierie qui est utilisé pour
153 justifier le niveau de sûreté requis.

154 B. Méthode résistance / contrainte

155 1) Cadre d'application

156 La méthode Résistance / Contrainte (R/C) est couramment utilisée pour le dimensionnement des pièces mécaniques et
157 l'évaluation de leur fiabilité (norme NF X50-144-5). C'est une approche fiabiliste permettant de définir des coefficients de
158 garantie nécessaire au regard des variabilités. La méthode R/C considère deux éléments antagonistes :

- 159 • La « Résistance » (R) qui représente la pièce qui doit « résister ».
- 160 • La Contrainte (C) qui représente la « contrainte », la « sollicitation » ou encore l'« environnement » subie par la
161 pièce et à laquelle elle doit résister.

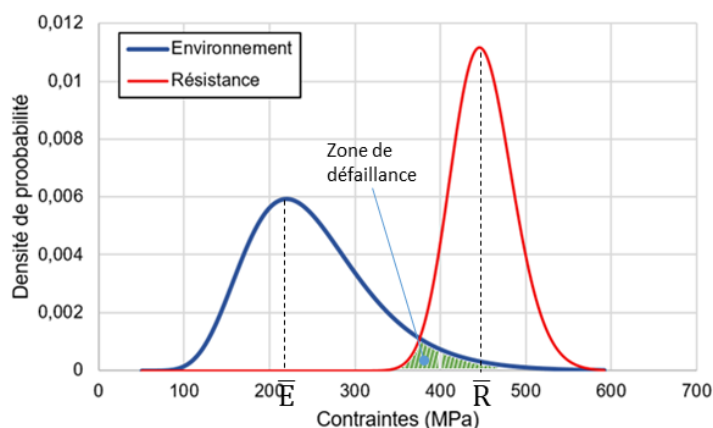
162 Elle représente alors ces deux éléments par deux variables aléatoires indépendantes notées respectivement R et E caractérisées
163 chacune par :

- 164 • Une loi de distribution (communément normale ou log-normale).
- 165 • Une valeur moyenne (notée \bar{R} et \bar{E}).
- 166 • Le coefficient de variation de la distribution (noté CV_R et CV_E).

167 Cette méthode peut alors être utilisée de plusieurs manières :

- 168 • La connaissance de ces caractéristiques (type de lois, moyenne et variation) permet de calculer la probabilité de
169 défaillance correspondant au cas où la contrainte est supérieure à la résistance. On évalue alors la fiabilité d'une
170 pièce donnée dans un environnement donné.
- 171 • Réciproquement, en connaissant l'objectif probabiliste et en caractérisant les formes de distribution de la résistance
172 et de l'environnement (type de lois et coefficients de variation), il est possible de définir le coefficient de garantie à
173 atteindre (noté CG avec $CG = \bar{R}/\bar{E}$). Cela permet de concevoir la pièce conformément aux objectifs de sûreté.
- 174 • Avec les mêmes données d'entrée, la méthode R/C calcule un paramètre complémentaire : le facteur d'essai. C'est
175 un facteur multiplicatif au coefficient de garantie utilisé dans le cadre de validation des objectifs de sûreté par essais.

176 Le graphique de la Fig. 4 représente classiquement le principe de la méthode résistance contrainte. Visuellement, la zone de
177 défaillance indiquée sur ce graphique situe le cas où la contrainte est supérieure à la résistance et donc où la pièce devient
178 défaillante.



179 Fig. 4. Illustration de méthode Résistance – Contrainte

181 Dans le cadre de la conception et de la justification de sûreté du DCo, cette méthode permet de traduire les objectifs de sûreté
182 en critères technologiques pour chaque pièce mécanique.

183 2) Exemple applicatif

184 Prenons par exemple une représentation de la résistance et de la contrainte par deux distributions de type log-normale, un
185 $CV_R = 8\%$ et un $CV_E = 30\%$ (valeurs type qui dépendent des pièces analysées et des contraintes subies), pour un objectif

186 probabiliste de 10^{-7} . Alors le coefficient de garantie à atteindre (par application des formules soutenant la méthode R/C) vaut 4,7
187 et le facteur d'essai vaut 1,1 (pour un seul essai réalisé).

188 Ainsi, il faut prouver qu'il y a un rapport d'au moins 4,7 entre la résistance moyenne de la pièce et la contrainte moyenne
189 appliquée. Pour une validation par essai, il faut et il suffit de réussir un essai sévéré avec une contrainte 5,2 (= 4,7 x 1,1) fois
190 supérieure à la contrainte nominale.

191 A noter que la prise en compte des moyennes des distributions dans l'approche R/C induit des marges (non valorisées) lorsque
192 la résistance ou la contrainte est connue via un extremum. Par exemple, la contrainte est plafonnée par la taille limite imposée à
193 l'édifice expérimental et la résistance du matériau est souvent minorée par ses caractéristiques normatives (mais, de nombreux
194 autres facteurs influencent les calculs). Cette prise de marge, non valorisée dans le cadre de l'analyse sûreté des DCo, répond
195 notamment aux incertitudes évoquées précédemment.

196 Quel que soit le cas d'utilisation de cette méthode, il est nécessaire de connaître certaines informations sur la résistance et la
197 contrainte en jeu. A minima, les formes des deux distributions (lois + CV) doivent être connues (ou à défaut supposées), et
198 l'environnement doit être connu.

199 Enfin, cette méthode ne permet pas à elle seule de justifier le niveau de sûreté ; il faut justifier les paramètres d'entrée
200 considérés lors de l'utilisation de cette méthode puis il faut évaluer par calcul numérique ou par mesure la résistance et la
201 contrainte pour vérifier la conformité aux critères qui en sont issus.

202 C. Illustration des outils mis en œuvre

203 Différents outils mis en œuvre pour répondre à la méthode R/C sont illustrés ci-dessous.

204 1) Modélisation numérique

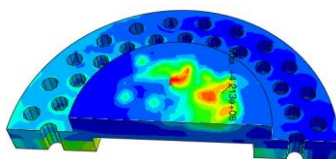
205 L'objectif de la modélisation numérique est de simuler le comportement du DCo pendant une expérience ainsi que les
206 contraintes qui s'appliquent. Les différentes pièces mécaniques sont modélisées par éléments finis. Les liaisons vissées ou
207 soudées entre pièces sont également modélisées avec une précision adaptée aux enjeux de ces liaisons.

208 La simulation globale s'appuie sur une chaîne de trois codes numériques permettant de traiter chacun une physique :

- 209 • Le premier code concerne la modélisation du phénomène expérimental dont l'objectif est de recueillir les contraintes
210 appliquées sur la peau interne de la cuve.
- 211 • Le second code concerne le comportement de la cuve et la transmission des contraintes mécaniques au reste du DCo
212 et aux équipements en interface.
- 213 • Le troisième code concerne le comportement global du DCo (notamment l'enceinte).

214 Cette modélisation permet d'évaluer les contraintes subies par chaque pièce et donc de vérifier si les coefficients de garantie
215 sont respectés. Des analyses spécifiques des liaisons permettent également de vérifier leur conformité aux objectifs de sûreté.

216 L'enchaînement de ces différents codes de calcul implique un certain nombre d'incertitudes qui motivent la prise en compte
217 de marges (en prenant les valeurs extrémales des paramètres par exemple ou dans les valeurs des CV_E) et la confrontation aux
218 données expérimentales.



219
220 Fig. 5. Exemple de restitution d'une modélisation numérique – champ de contraintes

221 L'image de la Fig. 5 illustre une restitution possible de la simulation numérique pour une pièce où le code couleur représente
222 l'intensité de la contrainte dans la pièce. Lorsque les pièces peuvent être instrumentées lors des tirs d'essai, il est possible de
223 comparer les niveaux de contraintes simulés avec les mesures expérimentales afin de valider la représentativité du modèle. De
224 façon plus générale, cela permet de vérifier l'acceptabilité de la pièce telle que conçue.

225 2) Analyse de pièces sacrificielles

226 Pour répondre aux différentes incertitudes évoquées, les premières pièces principales fabriquées du DCo ont été sacrifiées
227 pour réaliser une expertise technique afin de mesurer leurs caractéristiques et la variabilité associée.

228 L'exemple de restitution (Fig. 6) montre une certaine marge entre les paramètres considérés par l'analyse de sûreté et les
229 valeurs mesurées sur la pièce sacrificielle. Cela justifie les valeurs des paramètres de la simulation et de l'approche R/C ainsi que
230 l'aspect majorant de la simulation.

231 Ces preuves sont acceptables uniquement si on assure que les pièces sacrifiées sont représentatives des pièces de série
232 fabriquées ultérieurement. C'est l'analyse de sûreté pratique et le recueil des documents probatoires à chaque fabrication qui le
233 justifient.

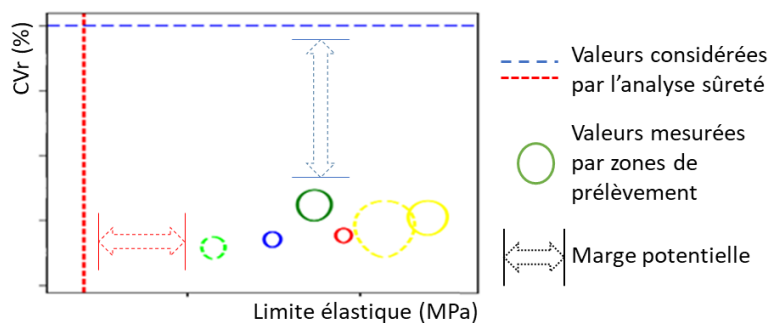


Fig. 6. Exemple de restitution de l'analyse de pièces sacrificielles

3) Tirs d'essai

Les premiers DCo réalisés ont servi à des tirs d'essai et de qualification. Le DCo est alors spécifiquement instrumenté pour mesurer les contraintes subies et les comparer aux résultats numériques. Cet exemple de graphique (Fig. 7) représente la restitution en plusieurs points de mesure indiquant successivement l'admissible de sûreté (issu de l'approche R/C), le prévisionnel numérique et les mesures expérimentales. Cela montre que l'expérimental respecte les seuils de justification de la sûreté et que le modèle numérique de comportement du DCo est « fidèle » à la réalité (en étant majorant par rapport à l'expérience sauf au point P6 sur cet exemple qui reste largement inférieur à l'admissible et pour lequel des recherches de causes sont engagées).

Cet exemple illustre également les marges successives prises entre l'objectif de sûreté, la simulation numérique et la « réalité » des pièces.

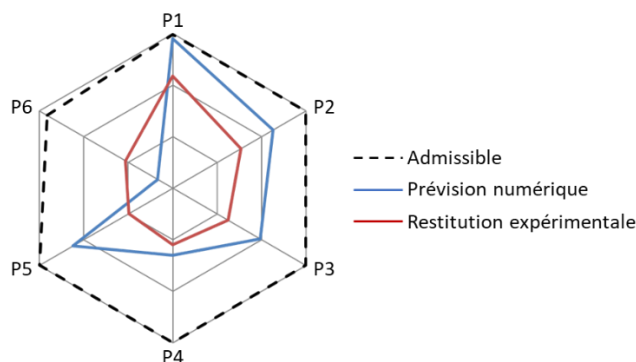


Fig. 7. Exemple de restitution de l'analyse d'un tir d'essai

D. Facteurs organisationnels et humains

L'analyse exhaustive des procédures est un outil utilisé pour concevoir les procédures. L'analyse sûreté des DCo identifie des opérations retenues comme barrières « d'utilisation » et doit les valoriser en termes de probabilité d'échec.

Au-delà de la valorisation de chaque opération humaine retenue qui s'appuie sur un retour d'expérience interne, la maîtrise des opérations humaines repose sur l'adjonction d'opérations de contrôle nommées « Contrôle de Sûreté » (CS) et « Vérification de Sûreté » (VS). Les règles de valorisation des opérations humaines sont les suivantes afin de s'assurer de la complémentarité et de l'indépendance des différentes opérations :

- Le non-respect ou la mauvaise exécution d'une opération « de réalisation » décrite par une procédure, réalisée par un opérateur formé et qualifié est évalué à 10^{-3} par opération.
- Un CS doit être effectué par un opérateur autre que le réalisateur (souvent un responsable des opérations) présent sur place en permanence. Cela permet d'améliorer le niveau de qualité globale de l'opération.
- Une VS doit être effectuée par un contrôleur non présent pendant l'opération. Cette vérification par des « yeux externes » permet une amélioration plus forte du niveau de qualité globale qu'un CS.

Les CS et VS ne sont pas cumulables.

Le schéma suivant (Fig. 8) présente un extrait d'arbre de défaillance illustrant la prise en compte du facteur humain. Dans cet exemple, l'expérience n'est autorisée que si une valeur seuil de pression est atteinte. Non seulement, les opérateurs doivent respecter cette consigne à tout moment, mais le responsable des opérations doit donner son autorisation après vérification du critère. L'analyse sûreté a donc considéré une barrière par les opérateurs et un contrôle de sûreté par le responsable des opérations.

Les opérations humaines considérées par l'analyse sûreté font l'objet d'un suivi spécifique via les procédures et les comptes rendus d'opérations.

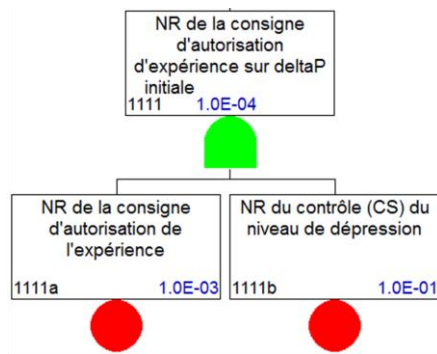


Fig. 8. Exemple de mise en œuvre d'un contrôle de sûreté

E. Modes communs

L'analyse des modes communs part du constat que si une première barrière est défaillante face à une agression donnée, il est très probable qu'une seconde barrière de technologie identique soit également défaillante à sollicitation égale : deux barrières technologiquement identiques sont affectées des mêmes phénomènes de défaillance dans le même environnement de fonctionnement. Il s'agit bien d'un mode de défaillance commun à plusieurs événements de base.

Les principes suivants sont mis en œuvre vis-à-vis de la prise en compte des modes communs :

- La probabilité de défaillances « de base » des deux (ou plus) barrières considérées est la même (puisque les barrières sont, par définition du cas, identiques et dans les mêmes conditions de fonctionnement).
- De façon simple et conservatrice, la prise en compte du mode commun réside alors dans la dégradation (arbitraire) de la probabilité de défaillance allouée à la deuxième barrière par rapport à la première (et éventuellement de la troisième barrière par rapport à la deuxième).
- La probabilité de l'ensemble des barrières identiques est limitée à 10^{-6} ou, exceptionnellement, à 10^{-7} avec un argumentaire adéquat.

Les mêmes principes peuvent s'appliquer aux barrières d'utilisation, notamment pour les opérations identiques réalisées « à la chaîne » sur des équipements similaires par un même opérateur. Par exemple, il peut s'agir de la fermeture d'une série de vannes : le même geste sur des interfaces identiques est répété. Le risque d'oublier une opération ou de valider la même conclusion sans réelle vérification augmente d'une opération à l'autre. Ainsi, l'approche modes communs est appliquée de façon pratique à la fois aux barrières technologiques et d'utilisation lorsque la situation se présente.

On retiendra que la répartition des poids en application de ce principe n'a pour but que de s'assurer que l'objectif global de sûreté est atteint avec des barrières identiques successives. Dans la réalité, le poids de sûreté affecté à la première barrière est également le poids affecté aux autres barrières. Cela signifie que les mêmes exigences de qualité sont requises sur l'ensemble des barrières identiques notamment pour l'analyse de réalisation.

Le schéma suivant (Fig. 9) propose une situation d'illustration de ces propos :

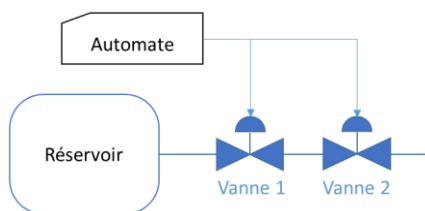


Fig. 9. Exemple de système

L'étanchéité du réservoir est réalisée par deux vannes identiques en série (double barrière) commandées par le même automate. La fuite du réservoir intervient lorsque les deux vannes (fermées par défaut) deviennent défaillantes.

L'arbre de défaillance de cet événement redouté peut être représenté par la Fig. 10.

Pour cet exemple, on suppose que la défaillance de l'automatisme impacte les deux vannes à la fois, c'est donc le même événement de base qui affecte les deux vannes. On pourrait l'appeler « événement commun » mais ce n'est pas un « mode commun » au sens de ce chapitre. La convention du logiciel utilisé fait apparaître ces événements dits en « copie identique » avec un numéro et une pastille bleue pour les événements recopiés.

Dans le cas de la défaillance intrinsèque des vannes, il y a un événement de base pour chaque vanne avec une probabilité de défaillance intrinsèque de 10^{-3} par phase opérationnelle pour chaque vanne (valeur pour l'exemple). Pour la prise en compte des phénomènes de modes communs, la deuxième vanne (le choix de la vanne affectée est arbitraire) est affectée d'une probabilité moins bonne prise à 10^{-1} .

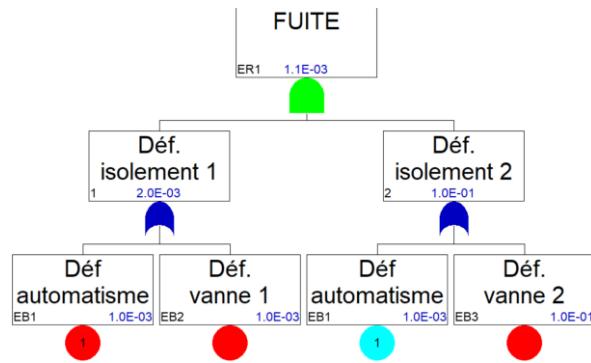


Fig. 10. Exemple d'arbre de défaillance (modes communs)

Cet arbre de défaillance a donc deux coupes minimales :

- EB1 (défaillance de l'automate) : 10^{-3}
- EB2 – EB3 (défaillances des deux vannes) : 10^{-4}

On voit alors, dans cet exemple, que pour un objectif de 10^{-4} pour la défaillance des vannes, la « performance » de chaque vanne doit être prise à 10^{-3} et non 10^{-2} comme on pourrait le faire en répartissant équitablement l'objectif entre les vannes.

A noter que ces principes de valorisation des modes communs présentent dans des configurations plus complexes une surestimation de la probabilité finale (ce qui va dans le « bon sens » pour l'exercice recherché). C'est le cas, par exemple, lorsque l'aspect « mode commun » n'affecte que partiellement au moins une barrière. Il faut alors utiliser des paramètres de mode commun et potentiellement des fonctions conditionnelles pour le calcul de probabilité. Le cas s'est présenté de façon très ponctuelle dans l'étude menée et ne justifie pas de tels types de calculs.

V. SURETE PRATIQUE

Parce que les pièces principales d'un dispositif de confinement sont fabriquées spécifiquement pour les DCo en très petites séries sur une durée relativement longue, une analyse de la sûreté de réalisation (ou « sûreté pratique ») est nécessaire (norme NF C20-311).

L'analyse de sûreté de réalisation permet de montrer que le produit tel que réalisé est conforme à la définition déposée, c'est-à-dire que la probabilité de non-conformité du produit à la fin de sa réalisation est équivalente aux objectifs probabilistes qui lui ont été alloués. Elle contient l'analyse du procédé de fabrication et détaille à chaque étape le risque de non-conformité. Elle présente les parades mises en place dans le procédé pour assurer un niveau de conformité donné.

Tel que défini par la norme NF C20-311, les éléments centraux de cette analyse sont les « paramètres de sûreté ». Ces derniers sont identifiés par l'analyse de sûreté théorique, et l'analyse de sûreté de réalisation justifie que ces paramètres de sûreté sont « fabriqués » avec le niveau de conformité adéquat. Les paramètres de sûreté peuvent alors être déclinés de façon pratique en paramètres de réalisation et de contrôle dans la phase de réalisation.

La définition « pratique » des paramètres de sûreté et leur traitement peuvent nécessiter un effort important de justification. La norme, encore récente au moment des études, fournit des éléments de hiérarchisation des efforts d'analyse entre les paramètres de sûreté.

Compte tenu de l'architecture des DCo, leur analyse de sûreté pratique n'a pas mis en œuvre tous les moyens de hiérarchisation des paramètres de sûreté autorisés par la norme. Les paramètres de sûreté ont tous été considérés au même niveau d'importance (pour un objectif probabiliste donné) pour s'assurer et assurer au DSND la garantie de maintenir les marges constatées par l'expertise des pièces sacrificielles et l'analyse des tirs d'essai.

En effet, certains matériaux et certaines techniques de réalisation ont été spécifiquement mis en œuvre par les industriels pour les besoins du CEA dans le cadre d'une collaboration académique et industrielle. Il existe donc que peu de statistiques sur l'élaboration et la mise en œuvre des pièces mécaniques, et l'analyse de sûreté pratique s'est voulue exhaustive.

Il résulte de cette analyse de sûreté pratique une liste de paramètres par composant associés à des documents probatoires. Ces documents probatoires, de types gamme opératoire, PV de contrôle, etc., sont à recueillir, vérifier et historiser par le CEA auprès des industriels, des fournisseurs et des équipes d'exploitation pour chaque DCo réalisé et mis en œuvre.

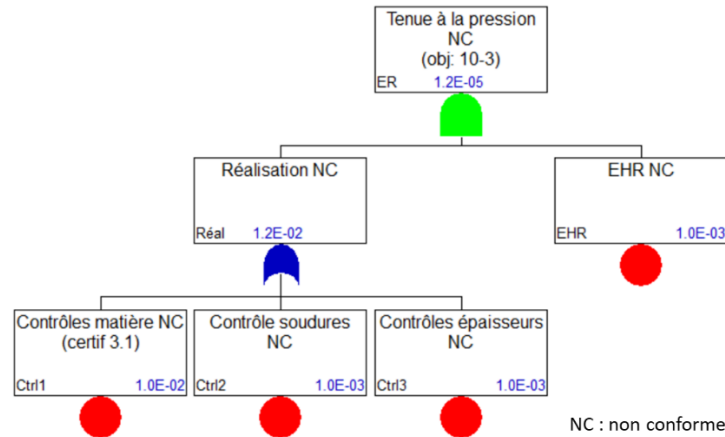
L'arbre de défaillance proposé en Fig. 11 décrit le principe de l'analyse de sûreté pratique pour un paramètre de sûreté.

Considérons que la tenue à la pression d'une pièce soit un paramètre de sûreté avec un objectif probabiliste de 10^{-3} par expérience (objectif issu de la sûreté théorique). Il faut alors prouver que pour chaque pièce fabriquée, la probabilité que celle-ci soit effectivement non conforme sur ce paramètre est au maximum de 10^{-3} .

Dans cet exemple, l'épreuve hydraulique de référence (EHR) est valorisée à 10^{-3} et pourrait à elle seule répondre à l'objectif de sûreté. Toutefois, dans la pratique, cette épreuve est réalisée à la fin du processus de réalisation lorsque toutes les pièces sont fabriquées et assemblées. Détecter une non-conformité aussi tardivement peut être problématique, d'autant plus que c'est un

349 contrôle global de l'assemblage et non un contrôle spécifique de la pièce. Des contrôles en phase de réalisation sont donc ajoutés
350 dans l'analyse sur les différentes sources de non conformités ; ce sont les paramètres de réalisation et de contrôle. Dans cet
351 exemple :

- 352 • Les caractéristiques de la matière font l'objet d'un certificat de conformité « 3.1 » suivant la norme NF EN 10204.
- 353 • Les soudures font l'objet d'un processus standardisé et qualifié dont une étape de contrôle.
- 354 • Les épaisseurs des pièces font l'objet d'un contrôle dimensionnel.



355

356

Fig. 11. Exemple d'arbre de défaillance en sûreté pratique

357 Dans la pratique, l'expérience du CEA fournit des règles pour la valorisation des différentes opérations de fabrication ou de
358 contrôle. Par défaut, et de façon similaire au FOH, une opération faisant l'objet d'une gamme opératoire rédigée conformément
359 à un processus qualité, réalisée par des opérateurs formés qui rédigent un PV de réalisation est valorisée à hauteur de 10^{-3} . Dans
360 ce cas, la gamme opératoire et le PV de réalisation sont des documents probatoires à recueillir.

361 Les DCo présentent de nombreuses pièces uniques sur lesquelles repose un objectif à 10^{-7} . Pour autant, et comme le note la
362 norme citée précédemment, il est accepté pour l'analyse de sûreté pratique de ne justifier « qu'un 10^{-6} » pour ces pièces en phase
363 de réalisation. Il est en effet difficile de techniquement mettre en œuvre des barrières en nombre suffisant et réellement
364 indépendantes ou efficaces. Il est donc préférable « de justifier correctement un 10^{-6} que de peiner à chercher un 10^{-7} ».

365

VI. REALISATION INDUSTRIELLE

366 Il s'agit ensuite de s'assurer que les opérations de fabrication, de contrôle et de montage sont conformes à ces différentes
367 analyses documentaires. C'est le but des actions de suivi et de surveillance industriels menées par le CEA auprès de ses
368 fournisseurs.

A. Suivi industriel

370 La fabrication des DCo est confiée à des industriels auxquels sont exprimées des exigences de fabrication qui englobent a
371 minima les exigences de sûreté (définies précédemment par les sûretés théorique et pratique). La documentation probatoire
372 définie par la sûreté pratique est exigée aux industriels dans le cadre des contrats, et les mesures et enregistrements spécifiques
373 nécessaires sont explicitement indiqués. A noter que certaines exigences incombent aux équipes d'exploitation du CEA réalisant
374 les dernières opérations d'assemblage et de contrôle des DCo juste avant l'expérience.

375 L'industriel répond aux exigences du CEA en éditant un dossier documentaire dont le document « chapeau » est une
376 procédure générale de réalisation listant pour chaque pièce ou sous-ensemble les étapes successives de réalisation et de contrôle.
377 Chaque étape identifie les documents de référence (plans, gammes opératoires, ...), indique les documents de suivi à fournir et
378 les éventuels points de suivi qualité (en interne ou avec les cotraitants et le CEA.).

379 De façon classique, l'industriel doit mettre en place une gestion des écarts qui définit les règles de maîtrise des non-
380 conformités du produit et d'instruction des faits techniques. Notamment, toutes les non conformités concernant les paramètres de
381 sûreté doivent être déclarées, traitées et soumises à l'avis du CEA.

382 Afin de s'assurer de la conformité, des coûts, des délais, de la qualité et de la performance du produit, l'activité de suivi
383 industriel (par le CEA) est permanente et globale en termes d'interface et de planification avec les industriels.

384 Notamment, une recette formalisée est réalisée entre le fournisseur et le CEA pour chaque sous-ensemble principal. Lors de
385 ces recettes, le CEA doit disposer de l'ensemble des enregistrements des contrôles et des essais attestant de la conformité du sous-
386 ensemble concerné, y compris l'acceptation des paramètres non-conformes et le traitement des faits techniques.

387 A noter que la justification de la réalisation peut s'appuyer, lorsque l'objectif sûreté est fortement contraignant, sur des
388 contrôles dits de « niveau 2 ». Dans ce cas, l'industriel réalisateur effectue les contrôles « niveau 1 » et fournit des échantillons
389 de matière au CEA ou à l'industriel assembleur qui fera effectuer de façon indépendante les mêmes contrôles.

390 L'ensemble de ces éléments (lorsqu'ils sont acceptables, bien évidemment) permet au CEA de s'assurer que chaque DCo
391 réalisé est conforme aux analyses de sûreté.

392 B. Surveillance industrielle

393 En complément, une surveillance industrielle est mise en place. De façon pratique, les actions de surveillance industrielle
394 consistent, pour le représentant du CEA, à assister à certaines opérations de fabrication ou de contrôle sur leur lieu de réalisation
395 pour en observer leur conformité au référentiel. L'objectif ici est de s'assurer que le processus de réalisation (et non le produit
396 réalisé) est conforme au référentiel établi.

397 Les principales améliorations attendues issues des actions de surveillance industrielle sont, entre autres, dans le respect de la
398 responsabilité des industriels :

- 399 • L'anticipation et la prévention, lors de la qualification industrielle, des difficultés de production.
- 400 • La réévaluation continue des qualifications industrielles.
- 401 • La réduction du nombre d'écarts de production et du temps nécessaire pour leur traitement.
- 402 • Une meilleure maîtrise des opérations sensibles.
- 403 • In fine, la maîtrise de la qualité des produits réalisés.

404 Les activités de suivi et de surveillance sont bien différentes mais contribuent toutes les deux à la qualité de réalisation des
405 produits.

406 VII. REUTILISATION

407 La plupart des expériences menées en DCo mettent en œuvre des matières soit nucléaires soit toxiques qui contaminent
408 l'intérieur de la cuve. Les DCo concernés sont alors entreposés au sein de l'installation EPURE avec un système de traitement
409 de leur atmosphère dans l'attente d'un traitement définitif (décontamination, stockage long, autres).

410 Pour les quelques DCo qui n'ont pas vu de telles matières, des considérations de coûts et de délais apparaissent et questionnent
411 la réutilisation de ces DCo. Le principe appliqué pour justifier la réutilisation de pièces d'un DCo est de prouver qu'une pièce
412 déjà utilisée possède toujours les mêmes caractéristiques qu'une pièce neuve telle que définie par l'analyse de sûreté théorique.

413 Il s'avère que certains critères (par exemple les caractéristiques mécaniques des matériaux évaluées par essais mécaniques)
414 ne peuvent pas être vérifiés sur des pièces finies (pour le même exemple, il faudrait prélever de nouvelles éprouvettes ce qui
415 n'est pas possible sur des pièces finies sans remettre en question leur intégrité).

416 La démarche mise en œuvre se décompose donc en deux étapes :

- 417 • Une analyse théorique générique dont l'objectif est de définir les critères nécessaires et suffisants à appliquer sur les
418 pièces à réutiliser pour justifier leur conformité.
- 419 • L'application de ces critères sur chaque pièce à réutiliser justifiant leur conformité individuelle.

420 L'analyse théorique de réutilisation, s'appuie à la fois sur une analyse des données expérimentales et sur une démonstration
421 numérique. Le DCo ayant servi pour un essai sévéré a fait l'objet d'une expertise après expérience. Les résultats ont montré
422 que les caractéristiques mécaniques n'avaient pas évolué, et le caractère sévéré de l'essai observé donne confiance dans le
423 maintien de ces caractéristiques après une expérience nominale. Les démonstrations numériques viennent compléter cette analyse
424 expérimentale sur les paramètres qui ne peuvent être maintenus après expérience comme par exemple l'état de surface intérieure
425 de la cuve nécessairement impacté par l'expérience.

426 Ce type de démarche doit nécessairement être adapté à chaque produit car il dépend notamment des connaissances
427 expérimentales existantes et des marges prises à la fabrication.

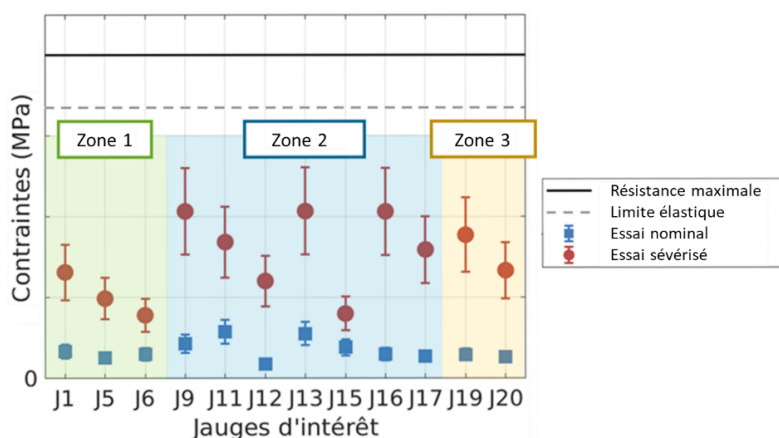


Fig. 12. Exemple d'analyse des données expérimentales

428
429

430 L'illustration de la Fig. 12 montre que la pièce analysée subit bien évidemment des contraintes plus fortes lors de l'essai
431 sévéré que lors de l'essai nominal. Les contraintes subies lors des deux essais sont inférieures à la limite élastique du matériau
432 ce qui indique que la pièce « travaille » dans sa zone élastique et conserve ses caractéristiques mécaniques. Cette analyse,
433 complétée d'autres analyses expérimentales (dont l'analyse des dimensions), permet de justifier que les DCo utilisés pour des
434 expériences nominales conservent leurs caractéristiques mécaniques. Cela permet de ne pas refaire d'essais mécaniques sur les
435 pièces à réutiliser.

436 VIII. CONCLUSIONS

437 La conception de tels dispositifs de confinement susceptibles de contenir de la matière nucléaire doit être pensée dès le départ
438 dans le cadre de la sûreté nucléaire. L'adaptation des référentiels de sûreté existants s'est fait progressivement en collaboration
439 entre les différents interlocuteurs. Un travail collaboratif avec les industriels a permis d'atteindre les objectifs de sûreté de
440 réalisation. Un effort d'amélioration continue dans la conception des DCo et dans l'exercice de justification a été constaté par
441 l'autorité de tutelle.

442 En termes de limites de la démarche, la démonstration de sûreté prend des conservatismes en réponse à certaines incertitudes,
443 par exemple sur les caractéristiques matériaux, sur les sollicitations expérimentales ou encore sur la robustesse des simulations,
444 etc. Cela se traduit en particulier par certains surdimensionnements ou des exigences élevées en fabrication. Dans un objectif
445 d'amélioration continue, un travail permanent de recherche expérimentale sur la caractérisation des phénomènes mis en œuvre
446 et des matériaux utilisés permet de mieux maîtriser les paramètres d'analyse comme par exemple les paramètres de l'approche
447 R/C permettant de justifier les coefficients de sécurité ou encore la représentativité des codes de calcul. Cela contribue à
448 consolider progressivement les analyses sûreté et à ajuster l'effort de réalisation et d'exploitation.

449 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

450 Arrêté du 15/02/2022 fixant les règles générales relatives aux installations et activités nucléaires intéressant la défense (arrêté
451 IANID)

452 Norme NF X50-144-5 juillet 2019 – Démonstration de la tenue aux environnements – Conception et réalisation des essais en
453 environnement – partie 5 : coefficient de garantie

454 Norme NF C20-311 juin 2021 – Sécurité de réalisation

455 Norme NF EN 10204 janvier 2005 – Produits métalliques – Types de documents de contrôle

456 Documentation interne CEA confidentielle :

- 457 • Guide relatif à la démarche d'acquisition de la sécurité d'un système
 - 458 • Guide – Méthodologie d'établissement des AQS et trames associées
 - 459 • Principe de mise en œuvre de la surveillance industrielle relative aux produits armes
 - 460 • Installation EPURE – Objectifs généraux de sûreté / sécurité
 - 461 • Dossier de sûreté des DCo FR
- 462