Matthieu DULUC

Sûreté-Criticité

Des phénomènes physiques à l'analyse de sûreté nucléaire





edp sciences

Sûreté-Criticité

Des phénomènes physiques à l'analyse de sûreté nucléaire

Invisible et d'une puissance redoutable, la réaction de fission en chaîne est au cœur de la production d'énergie dans les réacteurs nucléaires. Mais hors de ce cadre rigoureusement maîtrisé, elle peut se transformer en un danger mortel. C'est tout l'enjeu de la sûreté-criticité : une discipline essentielle qui vise à prévenir les accidents de criticité lors de la manipulation de matières fissiles comme l'uranium 235 ou le plutonium 239, dans les usines et laboratoires du cycle du combustible nucléaire, ou lors de leur transport.

À la croisée de la physique nucléaire, de l'ingénierie et de la sûreté, cet ouvrage offre un éclairage documenté sur une discipline exigeante et méconnue. À travers des principes fondamentaux, des exemples concrets et les leçons tirées d'accidents réels, il révèle le travail rigoureux nécessaire pour garantir la sûreté-criticité tout au long du cycle du combustible nucléaire. Structuré en 15 grandes parties, ce livre permet au lecteur de :

- comprendre les bases des phénomènes physiques et de la neutronique ;
- explorer la phénoménologie des accidents de criticité ;
- maîtriser la neutronique statique et dynamique ;
- s'initier à l'analyse de sûreté-criticité ;
- identifier les matières et opérations à risque ;
- découvrir les outils de calcul ;
- se familiariser avec la réglementation française et l'organisation en matière de sûreté-criticité ;
- retracer l'histoire de cette discipline.

Des exercices pratiques viennent enrichir le parcours pour consolider les acquis.

Destiné aux physiciens et ingénieurs impliqués dans la conception et la sûreté des installations du cycle du combustible nucléaire, cet ouvrage est également une ressource précieuse pour les élèves-ingénieurs et professionnels souhaitant approfondir leurs connaissances en sûreté-criticité.

***Matthieu DULUC,** fort de plus de 20 ans d'expérience dans le domaine de la sûreté-criticité, partage son expertise et sa passion à travers cet ouvrage. Son parcours, allant du Service d'Études de Criticité de l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire à la Direction Technique et Ingénierie de Framatome, couvre la majeure partie des aspects du domaine et enrichit cet ouvrage de son savoir unique.*

ISBN : 978-2-7598-3695-6

9 782759 836956

edp sciences
www.edpsciences.org

Matthieu DULUC

Sûreté-Criticité

Des phénomènes physiques à l'analyse de sûreté nucléaire

edp sciences

Cet ouvrage a bénéficié du soutien de Framatome.

framatome

Photos de couverture : à gauche, contrôle visuel des crayons de combustible MOX, MELOX, Bagnols-sur-Cèze, © Orano/Cyril CRESPEAU ; à droite, vue de MARACAS (Machine de rapprochement pour la criticité d'assemblages solides, 1983-1987), Valduc, © NEA (1995), *International Criticality Safety Benchmark Evaluation Project*, OECD Publishing, Paris.

Conception graphique de la couverture : CB Defretin

Les schémas de cet ouvrage ont été réalisés par Matthieu DULUC.

Imprimé en France

ISBN (papier) : 978-2-7598-3695-6 – ISBN (ebook) : 978-2-7598-3696-3

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1er de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.

© EDP Sciences, 2025
17 avenue du Hoggar – BP 112 – 91944 Les Ulis Cedex A – France

À mes parents, pour ce que je suis devenu.
À ma femme, pour ce que je suis.
À mes enfants, pour ce que je serai.

Préface

La Sûreté-Criticité a longtemps porté la mauvaise réputation d'être une discipline pointue fonctionnant comme un village gaulois, avec ses règles et ses méthodes propres, dans laquelle les non-spécialistes ne prenaient pas le risque de s'aventurer. Cette situation était entretenue d'une part par la diffusion limitée d'outils de calcul dont la mise en œuvre nécessitait un certain savoir-faire, d'autre part par l'absence d'ouvrage abordant les différents aspects du sujet. En outre, comme elle ne faisait pas l'objet d'un enseignement spécifique, c'est donc presque exclusivement par compagnonnage qu'il était possible de s'initier à la Sûreté-Criticité.

En revanche, le domaine d'activités nucléaires, qu'elles soient de laboratoire ou industrielles, nécessitant de prendre en compte le risque de criticité couvre une très grande variété de situations tant physiques que chimiques. Pour chacune de ces situations, une multitude de solutions s'offre pour prévenir le risque de criticité ; on choisira de préférence celle qui génère le moins de contraintes en exploitation et qui dépend le moins de facteurs organisationnels et humains.

Le présent ouvrage offre une vision large et renouvelée du sujet de la Sûreté-Criticité sans prétendre à l'exhaustivité. Sa lecture, avec modestie, vous guidera dans un parcours initiatique de découverte des différentes facettes du sujet de la criticité.

Patrick Cousinou
Chef du Service d'Études de Criticité de 1993 à 2003
Directeur adjoint de l'expertise de Sûreté Nucléaire de 2003 à 2015
Membre du GP des Usines et laboratoires de 1994 à 2023
Membre, puis Président de la CSC de 1997 à 2023
Membre de la CSLU à partir de 1997

Table des matières

Préface **iii**

Préambule **xvii**

Comment lire ce livre ? **xxi**

I Introduction **1**

II Qu'est-ce que le risque de criticité ? **7**

1 Définitions **11**
1.1 Accident de criticité 11
1.2 Risque de criticité 12
1.2.1 Criticité 12
1.2.2 Risque 12
1.3 Sûreté-criticité 13
1.4 Criticien 13

2 Introduction au risque de criticité **15**
2.1 Conséquences d'un accident de criticité 15
2.2 Quand y-a-t-il un risque de criticité ? 17
2.3 Sûreté-criticité et défense en profondeur 18
2.4 Comparaison entre la sûreté-criticité et la physique des réacteurs 20
2.5 Comparaison entre la sûreté-criticité et la radioprotection . 21

III Phénomènes physiques et éléments de neutronique à l'usage des criticiens 23

3 Rappels des phénomènes physiques 27
3.1 Matière et radioactivité 27
3.1.1 Atomes, noyaux et nucléons 27
3.1.2 Quantité de matière, nombre d'Avogadro et unité de masse atomique 28
3.1.3 Masse molaire 28
3.1.4 Isotopes d'un élément 29
3.1.5 Radioactivité 29
3.1.6 Énergie 30
3.1.7 Mode de désintégration 31
3.1.8 Chaîne de décroissance 34
3.2 Introduction au concept de dose 39

4 Le neutron 43
4.1 Fission induite et réaction en chaîne 43
4.1.1 Défaut de masse 44
4.1.2 Barrière de fission et risque de criticité 47
4.1.3 Réaction de fission en chaîne 49
4.1.4 Énergie de la fission 50
4.1.5 Neutrons émis par la fission 50
4.2 Fission spontanée 54
4.3 Photofission 54
4.4 Réaction (α, n) 54
4.5 Émission de neutrons « retardés » 54
4.6 Autres sources de neutrons 55

IV Neutronique « statique » 57

5 Interactions entre le neutron et la matière 61
5.1 Notions de section efficace microscopique et macroscopique 61
5.1.1 Section efficace microscopique 61
5.1.2 Section efficace macroscopique 68
5.2 Probabilité de première interaction et libre parcours moyen 69
5.3 Notion de flux et de flux en phase 70
5.4 Notion de courant 71
5.5 Bilan neutronique macroscopique, k_∞ et formule des quatre facteurs 72

6 Équation de Boltzmann 77
6.1 Forme intégro-différentielle 77
6.2 Forme intégrale 81

6.3 Notion de k_{eff} et de réactivité 83
6.4 Équation du ralentissement et notion d'autoprotection . . . 84
6.4.1 Ralentissement des neutrons 84
6.4.2 Équation du ralentissement 89
6.4.3 Notion d'autoprotection 95
6.4.4 Thermalisation 97

7 Équation de la diffusion 99
7.1 Approximation de la diffusion et loi de Fick 99
7.2 Équation de la diffusion 103
7.2.1 Application pour un système sphérique 104
7.3 Longueur d'extrapolation 105
7.3.1 Corps noir 105
7.3.2 Réflecteur et notion d'albédo 108
7.4 Formules simples 111
7.4.1 Formule du k_{eff} 111
7.4.2 Rayon critique d'une sphère nue et densité du milieu 112
7.4.3 B^2_{m} et densité du milieu 113
7.4.4 k_∞ et densité du milieu 113
7.4.5 Conversion de géométrie 114
7.4.6 Distance à vol d'oiseau parcourue par un neutron et aire de migration (M^2) 115
7.5 Théorie à deux groupes 116
7.5.1 Théorie à 1,5 groupe 118

8 Équation de Bateman 121
8.1 Présentation de l'équation de Bateman 121
8.1.1 Résolution des équations généralisées de Bateman . 124
8.2 Exemples analytiques liés à l'équation de Bateman 125
8.2.1 Production du plutonium dans un réacteur thermique 125
8.2.2 Production de ^{134}Cs et ^{137}Cs pour estimer le taux de combustion d'un assemblage combustible 128
8.2.3 Évolution du k_{eff} pour le stockage profond 130

V Paramètres ayant une influence sur le bilan neutronique 135

9 Production 139
9.1 Masse de matière fissile 139
9.2 Modération 140

10 Fuite 143
10.1 Densité 143
10.2 Géométrie 144

10.3 Réflexion 145
10.4 Interactions 147

11 Absorption **151**
11.1 Poisons spécifiques : B, Cd, Gd, Hf 152
11.2 Uranium 238, plutonium 240 et effet de l'hétérogénéité . . . 153
11.3 Azote 156
11.4 Hydrogène et notion de concentration critique limite en milieu infini 156

12 Triple rôle de l'hydrogène **157**

13 Autres paramètres ayant une influence sur le bilan neutronique **161**
13.1 Température 161
13.2 Pression 162
13.3 Répartition spatiale des caractéristiques de la matière fissile et de la modération 162
13.3.1 Hétérogénéité de la modération 162
13.3.2 Fractionnement de la matière 163
13.3.3 Hétérogénéité de la configuration 163
13.4 Sources extérieures de neutrons 164

VI Neutronique « dynamique » **165**

14 Réaction en chaîne et cinétique **169**
14.1 Prise en compte des neutrons retardés 170
14.2 Équation de Nordheim (*Inhour equation*) 172
14.3 Cinétique lente 172
14.4 Cinétique rapide 173
14.5 Système sous-critique à source extérieure 173
14.6 Prise en compte de contre-réactions dues aux phénomènes liés à la fission 174
14.6.1 Température 174
14.6.2 Radiolyse 183
14.6.3 Synthèse des modèles présentés 187

15 Neutronique stochastique **189**
15.1 Démarrage de la réaction de fission en chaîne 189
15.2 Mesure 194
15.2.1 Comptage neutronique total passif 194
15.2.2 Loi de Poisson 195
15.2.3 Comptage neutronique coïncident 196

VII Phénoménologie de l'accident de criticité 201

16 Milieux liquides (solutions) 205
16.1 CRAC . . . 205
16.2 SILENE . . . 206
16.3 Principaux enseignements . . . 208
16.3.1 Phénoménologie . . . 209
16.3.2 Premier pic de puissance . . . 211
16.3.3 Énergie totale . . . 213
16.3.4 Ébullition . . . 216
16.3.5 Radiolyse . . . 218
16.3.6 Expériences diphasiques . . . 219
16.3.7 Dosimétrie/radiobiologie . . . 222
16.3.8 Rejets . . . 223
16.3.9 Autres . . . 224

17 Milieux poudres 227

18 Milieux solides non modérés 229
18.1 Phénoménologie et fonctionnement d'un réacteur . . . 229
18.1.1 Fonctionnement du réacteur Caliban . . . 230
18.2 Premier pic de puissance . . . 231
18.3 Énergie totale . . . 232
18.4 Effet thermomécanique . . . 233
18.5 Dosimétrie . . . 233
18.6 Délai dans le démarrage de la réaction en chaîne . . . 235
18.7 L'accident de Sarov en 1997 . . . 236
18.8 Dragon . . . 237

19 Milieux hétérogènes 239
19.1 Réacteurs BORAX . . . 239
19.2 Réacteurs SPERT . . . 240
19.3 Accidents de criticité . . . 244

VIII Démarche de l'analyse de sûreté-criticité 245

20 Prévention du risque de criticité 249
20.1 Unité de criticité . . . 250
20.2 Mode de contrôle . . . 250
20.2.1 Masse de matière fissile . . . 252
20.2.2 Géométrie . . . 255
20.2.3 Concentration . . . 257
20.2.4 Modération . . . 258
20.2.5 Empoisonnement . . . 261

20.2.6 Utilisation de plusieurs paramètres pour le mode de contrôle . . . 265
20.3 Environnement . . . 269
20.3.1 Réflexion . . . 269
20.3.2 Interaction . . . 270
20.4 Milieu fissile de référence . . . 271
20.4.1 Forme physico-chimique, isotopie, nature, modérateur 272
20.4.2 Loi de dilution . . . 274
20.4.3 Humidité des poudres . . . 281
20.4.4 Modération hétérogène et équivalence entre $V_{\mathrm{mod}}/V_{\mathrm{fissile}}$ et H/X . . . 281
20.4.5 Choix du MFR . . . 283
20.5 Crédit burnup . . . 294
20.5.1 Introduction . . . 295
20.5.2 Calcul de l'évolution . . . 298
20.5.3 Conditions pénalisantes concernant le calcul d'évolution . . . 298
20.5.4 Données nucléaires utilisées pour les études de CBU 301
20.5.5 Mesure du taux de combustion . . . 301
20.6 Principe de double éventualité . . . 303
20.7 Études de dimensionnement . . . 305
20.7.1 Normes et standards de criticité . . . 305
20.7.2 Configuration 3D . . . 313
20.7.3 Synthèse des études . . . 317
20.7.4 Analyse du fonctionnement normal et des dysfonctionnements . . . 321
20.7.5 Interaction avec les autres risques . . . 325
20.7.6 Marges et critère de dimensionnement . . . 328
20.8 Moyens de contrôle . . . 334
20.9 Formation . . . 337

21 Limitation des conséquences d'un accident de criticité 339
21.1 Retour d'expérience des accidents de criticité . . . 339
21.1.1 L'accident de Tokaï-Mura . . . 344
21.2 Détection . . . 352
21.2.1 Pourquoi détecter un accident de criticité ? . . . 352
21.2.2 Problèmes liés à la détection d'un accident de criticité 353
21.2.3 Système EDAC . . . 357
21.3 Évacuation et mise à l'abri des personnes . . . 359
21.3.1 Au niveau du site . . . 360
21.3.2 À l'extérieur du site . . . 361
21.4 Intervention et arrêt de l'accident . . . 362
21.5 Conséquences . . . 363
21.5.1 Dosimétrie des rayonnements . . . 364
21.5.2 Rejets . . . 368

IX Matières présentant un risque de criticité 373

22 Uranium 377
22.1 Propriétés chimiques de l'uranium 379
22.1.1 Métal 379
22.1.2 Alliages d'uranium 379
22.1.3 Fluorures 379
22.1.4 UO_2F_2 et ADU 380
22.1.5 Oxydes 381
22.1.6 Extraction 381
22.1.7 Autres formes 382
22.2 Propriétés neutroniques de l'uranium 382

23 Plutonium 387
23.1 Propriétés chimiques du plutonium 388
23.1.1 Métal 388
23.1.2 PuF_6 et PuO_2F_2 389
23.1.3 Oxalate et oxydes 389
23.1.4 Solutions 389
23.1.5 MOX 390
23.2 Propriétés neutroniques du plutonium 390

24 Autres matières fissiles 395

X Opérations présentant un risque de criticité 397

25 Installations du cycle du combustible 401
25.1 Mines d'uranium et installations de conversion 401
25.1.1 Oklo 402
25.2 Enrichissement 402
25.3 Fabrication et entreposage amont 404
25.4 Réacteur 408
25.5 Entreposage aval et retraitement 413
25.6 Déchets 418
25.7 Démantèlement 419
25.8 Installation de recherche 422

26 Transport 423
26.1 Épreuves 425
26.2 Démonstration de la sous-criticité 426
26.3 Cas particulier des colis de type C 427
26.4 ISC et limitation du nombre de colis par envoi 427
26.5 Fissiles exemptés et exceptés 429
26.6 Certificat d'agrément 430

XI Codes de calcul 431

27 Prévention 435
27.1 Calcul du k_{eff} . . . 435
27.1.1 Déterministe . . . 436
27.1.2 Monte-Carlo . . . 445
27.1.3 Données nucléaires . . . 452
27.1.4 Qualification et estimation des biais . . . 454
27.2 Calcul d'évolution . . . 460
27.2.1 Méthodes disponibles . . . 460
27.2.2 Qualification des codes d'évolution . . . 462

28 Limitation des conséquences d'un accident de criticité 463
28.1 Nombre de fissions . . . 463
28.1.1 Codes de calcul . . . 463
28.1.2 Formules simplifiées . . . 465
28.2 Doses . . . 466
28.2.1 Rayonnements . . . 466
28.2.2 Rejets . . . 467

XII Réglementation, standard et guide 469

29 Corpus français actuel 471
29.1 Lois . . . 472
29.1.1 Le code de la santé publique . . . 472
29.1.2 Le code de l'environnement . . . 473
29.1.3 Autres codes . . . 474
29.1.4 Situations d'urgences . . . 474
29.2 Arrêté du 7 février 2012 . . . 475
29.3 Décision ASN n° 2014-DC-0462 . . . 477
29.4 RFS I.3.c . . . 478

30 Organisation de la sûreté en France 481

31 Dans le monde 485
31.1 AIEA . . . 485
31.2 ISO . . . 486
31.3 ANSI–ANS . . . 487
31.4 CEI . . . 488

XIII Histoire de la criticité 491

32 En France 495

32.1 Les prémices : 1945–1957 495
32.2 Les débuts : 1958–1975 496
32.2.1 Proserpine et Alecto 496
32.2.2 Création du SEC et de la station de criticité 497
32.2.3 Les outils 498
32.2.4 Les commissions de sûreté 499
32.3 Montée en puissance et « grands chantiers » : 1976–2002 . . 500
32.4 Après 2002 : structuration et introspection 501

33 Dans le monde **503**
33.1 États-Unis 503
33.1.1 Les pionniers 503
33.1.2 Documents de référence 504
33.1.3 Structuration 505
33.2 Les deux premières conférences de Genève 506
33.3 Royaume-Uni 506
33.4 Autres pays 507

XIV Exercices/Études de cas **509**

XV Annexe sur les interactions neutroniques **553**

34 Méthodes semi-empiriques **557**
34.1 Méthode de la densité analogique 557
34.2 Méthode NB_N^2 558
34.3 Méthode de la densité de surface 561

35 Méthodes d'interaction **563**
35.1 Méthode de l'angle solide 563
35.2 Méthode de l'albédo 568

36 Intersection de tuyauteries **569**

Bibliographie **571**
Sigles et acronymes 595
Glossaire 599

Index **603**

Préambule

L'IDÉE DE CE LIVRE est née du constat que, dans le domaine de la sûreté-criticité, le savoir se transmettait encore principalement de manière orale. Le sujet étant vaste, la courbe de progression est relativement lente, avec le risque de perdre des connaissances avec le renouvellement des générations. Il n'existe pas de document présentant de façon complète la sûreté-criticité. Quand un étudiant ou un nouvel embauché demandait ce qu'il pouvait lire, je proposais quelques références qui abordent le domaine, soit superficiellement, soit correctement mais seulement sur un de ses aspects très restreints ; cela ne me satisfaisait pas.

Ainsi, ce livre a pour ambition d'être le premier document de référence sur ce sujet écrit en français. Ce domaine est relativement ancien (le neutron a été découvert en 1932 et la première réaction de fission en chaîne d'origine humaine a eu lieu 10 ans plus tard) et je ne travaille dans ce domaine que depuis les années 2000, c'est-à-dire après le dernier accident de criticité bien documenté (Tokaï-Mura au Japon). Ainsi, bien des criticiens sont passés avant moi, et ce livre n'est que le fruit des connaissances qui m'ont été transmises. Qu'ils en soient sincèrement remerciés. Ce livre fera également référence à de nombreuses publications et documents, dont certains ont été oubliés par la communauté des criticiens. C'est également une occasion de mettre en lumière un domaine passionnant (certaines personnes y font toute leur carrière), mal connu (par rapport à son « cousin », la physique des réacteurs) et qui peut paraître, pour certains, un peu obscur et fermé (peut-être parce qu'il n'y avait pas d'ouvrage comme celui-ci !).

Un autre moteur de ce projet d'écriture est la maxime personnelle suivante : *on ne connaît bien une matière que si on sait l'enseigner.* Ainsi, j'ai toujours eu le goût de l'enseignement de ma spécialité, que ce soit dans le cadre de formations initiales (écoles d'ingénieurs, universités) ou de formations continues (en lien avec l'Institut national des sciences et techniques nucléaires (INSTN) ou les organismes de formation internes de mes différentes entreprises). La rédaction de ce livre, basée également en partie sur mes supports de cours, a aussi été pour moi l'occasion de consolider mes connaissances, de questionner mes méthodes pédagogiques, de redécouvrir certains aspects et même d'apprendre des choses. Ce livre servira pour les personnes désireuses d'en savoir plus, à l'issue de ces cours.

Ce projet est donc une étape importante de mon cheminement dans ce domaine même s'il n'en constitue pas l'aboutissement.

La rédaction de ce livre a été une aventure à la fois personnelle et collective. Personnelle d'abord, car de la première version du document, ne comportant qu'une ébauche de la structure (qui a, bien sûr, évolué avec le temps) à la version que vous lisez actuellement, tous les sentiments m'ont traversé : de l'euphorie au découragement, de la satisfaction à la perplexité. Une constante néanmoins : la volonté d'accomplir ce que je pensais impossible avant de commencer à écrire les premières lignes. Je remercie pour cela ma femme et mes enfants pour leur soutien et leurs encouragements dès le début de ce projet, qui a empiété sur le temps que je leur consacrais.

Collective ensuite, car même si je suis finalement l'unique auteur de ce livre, je tiens à remercier chaleureusement Grégory Caplin pour son accompagnement et ses conseils tout au long de ce projet. La qualité de ce livre a été largement améliorée par ses remarques, ses propositions et ses corrections. Ses connaissances, sa curiosité, sa pédagogie, son humilité m'ont toujours impressionné, que ce soit lorsque nous travaillions ensemble ou après, lors de nos nombreux échanges sur ce projet.

Je tiens également à remercier mon éditrice, France Citrini, qui m'a accompagné et rassuré tout au long de ce projet.

Ensuite, je remercie l'ensemble des personnes qui ont relu un ou plusieurs chapitres de ce livre, en particulier : Adrien Bidaud, Michaël Mangeon, Boukhmès Méchitoua, Vivian Salino, Marc Troisne, François Trompier, Paul Reuss et Alexis Valencia.

Par ailleurs, je tiens à remercier Framatome pour avoir sponsorisé ce livre, en particulier Gilles Perrin pour sa confiance.

De plus, je suis très reconnaissant envers l'ensemble des entreprises, des institutions et des photographes qui ont autorisé l'utilisation des images présentes dans ce livre : AIEA, ANL, CEA, EDF, Framatome, INL, JAEA, LANL, Mirion, OCDE/AEN, Orano, Orano NPS, ORNL et Christophe Lepetit.

Enfin, je tiens à remercier Patrick Cousinou pour avoir accepté de relire l'ensemble du livre et d'en écrire la préface.

Pour finir, l'humilité étant la principale qualité du criticien, j'ai conscience du fait que, malgré le travail effectué, cette première édition pourra être améliorée grâce à vos retours et commentaires, que j'espère nombreux.

Comment lire ce livre ?

Lire un livre de plus de 500 pages et en comprendre le contenu ne se fait pas en un jour. En fonction de votre objectif (initiation, perfectionnement, information sur un sujet précis, etc.), de vos connaissances initiales et de votre temps disponible, vous ne le lirez pas de la même façon.

Ce livre est découpé en différentes parties.

L'introduction (partie I) passée, je vous conseille de commencer par la partie II, qui présente globalement le risque de criticité, la sûreté-criticité et les principaux enjeux associés, et introduit des concepts qui seront détaillés par la suite. En fonction de votre intérêt, vous pourrez directement consulter les chapitres et sections mentionnés.

La partie III est un rappel des phénomènes physiques utiles pour comprendre ce sujet, tandis que la partie IV présente la neutronique statique. Ces deux parties pourront être parcourues plus ou moins en profondeur en fonction de votre formation et de votre temps disponible. Il pourra être utile de les consulter par la suite pour approfondir des sujets mentionnés ultérieurement, une complète maîtrise n'étant pas nécessaire pour aborder les autres parties de ce livre.

La partie V présente les paramètres ayant une influence sur le bilan neutronique et constitue un prérequis pour comprendre la partie VIII, relative à la démarche de l'analyse de sûreté-criticité. Cette dernière partie constitue le cœur de ce livre et devrait être systématiquement lue.

Les parties VI et VII sont relatives à la neutronique dynamique et à l'accident de criticité. Elles permettent de comprendre ce qui se passe lorsque les dispositions de prévention ne sont pas efficaces, et d'appréhender les dispositions prévues pour limiter les conséquences d'un accident de criticité, développées dans la partie VIII.

Les parties IX et X sont des approfondissements de la partie VIII selon deux angles différents, le premier lié aux matières fissiles, le second lié aux opérations du cycle du combustible (français). Ces parties pourront être plus ou moins approfondies.

La partie XI est consacrée aux codes de calcul utilisés en sûreté-criticité. Sa lecture n'est pas prioritaire dans un premier temps pour ceux qui découvrent le sujet.

La partie XII se concentre sur les « écrits » en lien avec la sûreté-criticité : réglementations, guides, standards. Elle présente également l'organisation jusqu'en 2025 de la sûreté nucléaire en France. La création de l'ASNR va conduire à des évolutions qui rendront cette partie de moins en moins pertinente avec le temps.

La partie XIII présente l'histoire de la criticité, principalement en France, dont la connaissance est toujours utile pour savoir d'où vient ce domaine.

La partie XIV contient des exercices. Ils sont importants pour consolider les connaissances apprises.

La partie XV est une annexe sur les interactions neutroniques. Cette partie ne sera utile qu'aux personnes curieuses de comprendre les méthodes

historiques de prise en compte de cette spécificité de la criticité, avant que les codes de calcul ne soient utilisés pour traiter ce sujet.

Enfin, un index détaillé a été réalisé car je sais d'expérience que c'est souvent le point d'entrée d'un livre.

Première partie

Introduction

L'industrie nucléaire utilise les différentes propriétés des noyaux atomiques pour la réalisation d'armes, la production d'électricité, la propulsion d'engins navals ou spatiaux et également pour la médecine (diagnostic et thérapie). Parmi ces propriétés, seul un très petit nombre de noyaux (quelques dizaines parmi plus de 4 000 connus) possède la capacité de fissionner, c'est-à-dire de se scinder en plusieurs noyaux (avec la libération d'autres particules, dont des neutrons), et d'entretenir une réaction de fission en chaîne. La mise en œuvre de cette propriété peut paraître complexe et mystérieuse, en grande partie car elle fait intervenir des phénomènes non visibles à l'œil nu, au comportement parfois contre-intuitif, mais aussi parce que les conséquences de ces phénomènes invisibles peuvent être dramatiques. Un accident de travail mortel a ainsi pu être causé par un tournevis... Celui-là s'est produit à Los Alamos, au Nouveau-Mexique (États-Unis), le 21 mai 1946, lors d'une « démonstration ». Elle consistait à présenter comment réaliser une expérience pour déterminer l'état critique d'une configuration composée d'une sphère métallique de plutonium [1] d'environ 6 kg et d'autres matériaux dits réflecteurs (deux hémisphères en béryllium). L'expérimentateur utilisait pour cela un tournevis permettant de maintenir soulevée la calotte supérieure en béryllium de façon à rester sous-critique comme illustré par la figure 1 [267]. Durant ces manipulations, le tournevis glissa et la calotte supérieure entoura complètement la sphère de plutonium, déclenchant ainsi un accident de criticité [2].

L'expérimentateur reçut alors une dose de rayonnement très importante, qui conduisit à son décès, neuf jours plus tard. Les autres personnes présentes dans la pièce reçurent des doses de rayonnement moins élevées, mais significatives, entraînant, pour certaines d'entre elles, des problèmes médicaux. Évidemment, ce type d'expérience n'a plus été réalisé par la suite, l'approche d'une situation critique ou légèrement sous-critique se faisant dorénavant à distance, avec les opérateurs protégés derrière des murs épais, dans le respect de procédures rigoureuses.

À ces quelques kilogrammes de plutonium manipulés dans les années 1945 succédèrent les tonnes de matières fissiles, actuellement mises en œuvre dans les installations du cycle du combustible. Bien que les énergies libérées par les accidents de criticité soient relativement limitées, le danger potentiel d'une irradiation grave des opérateurs situés à proximité de la source perdure.

1. Cette sphère devait initialement être employée dans une troisième arme nucléaire contre le Japon mais fut finalement utilisée pour des tests. Elle fut surnommée *Demon core* (cœur du démon) car elle a été impliquée dans deux accidents de criticité (celui de mai 1946, quelques mois après un premier accident en août 1945), tuant à chaque fois une personne [187].

2. Le film de Roland Joffé retraçant l'histoire du projet Manhattan, *Fat Man and Little Boy* (sorti en 1989 et plus connu sous son titre britannique *Shadow Makers* ou *Les maîtres de l'ombre* en français) consacre une large séquence à cet accident (en prenant néanmoins quelques libertés scénaristiques, en particulier vis-à-vis de la date à laquelle il s'est produit).



FIGURE 1 – Reconstitution de la configuration accidentelle [267] – [©Los Alamos National Laboratory]

Ainsi, le but de la sûreté-criticité est d'abord de garantir l'absence d'accident de criticité lors des opérations impliquant des matières fissiles (à chacune des étapes du cycle du combustible, lors de la réalisation d'expériences, etc.), que ce soit en fonctionnement normal ou en cas d'incidents (par exemple à la suite d'un dysfonctionnement du procédé, d'une défaillance d'un équipement ou d'une erreur humaine) ou d'accidents (tels qu'un séisme ou un incendie). La sûreté-criticité vise également à limiter les conséquences d'un hypothétique accident de criticité, car une garantie absolue d'absence d'accident est difficilement atteignable.

Ainsi, pour maîtriser le risque de criticité, il faut :

— appréhender les phénomènes physiques mis en jeu (ceux régissant la survenue d'un accident de criticité tout comme ceux à l'œuvre au cours de ce type d'accident) ;

— analyser en conséquence les opérations envisagées avec des matières fissiles afin de définir les dispositions permettant de prévenir les accidents de criticité (conception des équipements adaptés et définition des conditions de réalisation et de surveillance de ces opérations) ;

— décliner et mettre en œuvre les dispositions définies par ces analyses ;

— maintenir la vigilance sur leur exécution au quotidien et dans la durée (retour d'expérience, gestion des modifications, dérives lentes, accoutumance, vieillissement des équipements, etc.).

Aussi, même si, de l'extérieur, les personnes en charge de la sûreté-criticité sont uniformément désignées comme des « criticiens », la communauté de ces personnes, leurs missions et champs de compétences sont très divers et en interface avec de nombreuses autres disciplines. Ce livre traite principalement des deux premiers alinéas mentionnés précédemment, à savoir les différents phénomènes physiques mis en jeu liés à ce risque et la démarche de sûreté retenue.

Si vous n'aviez que quelques instants, je vous proposerais, pour résumer ce livre, cette citation de Claude Jouannaud [107] : *« le caractère particulier de ce risque est son absence de nuances ; un accident de criticité ne prévient pas et produit quasi instantanément des flux de rayonnements extrêmement élevés. La sûreté-criticité doit reposer sur une qualité exceptionnelle de la prévention, rendant hautement improbable un accident ; il est cependant nécessaire de mettre en place des dispositions destinées à limiter les conséquences d'une excursion critique. »*

Si vous avez davantage de temps, commencez la partie suivante !

Deuxième partie

Qu'est-ce que le risque de criticité ?

La propriété de certains noyaux fissiles, tel l'uranium 235 ou le plutonium 239, d'entretenir des réactions de fission en chaîne est utilisée pour la production d'énergie électrique dans le cœur des réacteurs nucléaires. Elle est également à l'origine d'un risque spécifique à l'industrie nucléaire : le risque de criticité. Il n'y a pas besoin d'une machine complexe ni de quantités très importantes de matières fissiles pour amorcer le phénomène de fission en chaîne : environ 500 grammes de plutonium 239 ou 50 kilogrammes d'uranium enrichi, tel que celui qui est utilisé pour fabriquer les combustibles des centrales nucléaires françaises, mélangés à de l'eau, suffisent, si certaines conditions sont réunies. Si une telle réaction de fission en chaîne intervient au cours de la manipulation de matières fissiles (dans un laboratoire, une installation de fabrication ou de traitement de combustibles, un entreposage ou au cours d'un transport), elle est accompagnée, comme dans un réacteur nucléaire, d'un dégagement d'énergie. Cette réaction de fission en chaîne se traduit également par la production de rayonnements gamma et de neutrons pouvant, dans les cas les plus graves, causer une irradiation mortelle pour les personnes se trouvant à proximité de l'équipement concerné, comme l'ont montré plusieurs des accidents survenus dans le monde depuis le premier d'entre eux, survenu à Los Alamos en février 1945.

Chapitre 1

Définitions

Comme tout domaine scientifique ou technique, le domaine de la sûreté-criticité est régi par quelques termes propres pour lesquels les définitions sont importantes, afin d'éviter toute ambiguïté ou quiproquo. Pour les besoins de ce livre, les définitions suivantes vont être utilisées [1]. Elles vont, de plus, permettre d'introduire des termes et concepts qui seront développés dans les chapitres ultérieurs.

1.1 Accident de criticité

Un accident de criticité est *« le déclenchement d'une réaction de fission en chaîne involontaire et incontrôlée, au sein d'un milieu initialement sous-critique »* [2]. Cette définition, qui s'inspire de celle du *Journal officiel* (JO) présente dans la décision de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) – décision n° 2014-DC-0462 [47], développée dans la section 29.3 –, permet d'introduire la notion de « réaction de fission en chaîne », qui sera développée dans la section 4.1.

Cette réaction en chaîne est involontaire, d'où la notion d'accident, et incontrôlée au sens où elle n'est pas contrôlée par l'homme [3]. Ceci permet de différencier l'accident de criticité (involontaire et incontrôlé), traité dans le chapitre 14 et la partie VII, d'un réacteur nucléaire (volontaire et contrôlé) ou d'une bombe nucléaire (volontaire et incontrôlée). La dernière partie de la définition (*« [...] au sein d'un milieu initialement sous-critique »*) permet de différencier l'accident de criticité d'un accident de réactivité qui peut

1. La référence [14] est à consulter pour toute question sur le vocabulaire de l'ingénierie nucléaire.

2. Pour une explication des termes « sous-critique », « critique » et « surcritque », se référer au tableau 6.1 de la section 6.3.

3. Comme vous le verrez dans la section 14.6, certains phénomènes physiques agissent « naturellement » sur le développement de la réaction de fission en chaîne.

survenir dans un réacteur nucléaire, pour lequel le milieu est initialement critique au moment de l'accident [4].

De cette notion d'accident de criticité découle naturellement la notion de risque de criticité.

1.2 Risque de criticité

Le risque de criticité est *« le risque de déclenchement d'une réaction de fission en chaîne incontrôlée au sein d'un milieu initialement sous-critique »*, d'après la décision ASN [47]. En d'autres termes, le risque de criticité est le risque de survenue d'un accident de criticité défini précédemment.

1.2.1 Criticité

En sûreté-criticité, par commodité ou abus de langage, le terme « criticité » est souvent utilisé pour désigner le terme « accident de criticité ». Ce terme peut aussi désigner le domaine technique et scientifique en lien avec la sûreté-criticité : par exemple, il est d'usage de parler d'une étude de criticité dans laquelle sont réalisés des calculs de criticité (qui sont en réalité des calculs de facteur de multiplication effectif !).

Ceci peut paraître confus, d'autant plus que la définition donnée par le *Journal officiel* du terme « criticité », utilisé seul, est la suivante : *État d'un milieu dans lequel s'entretient à niveau constant une réaction nucléaire en chaîne*. Il faut donc veiller, à chaque fois que le terme « criticité » est utilisé, à en identifier le sens exact. Pour ne pas user de termes qui ne seraient pas couramment employés, cet usage multiple du mot « criticité » pourra être rencontré dans ce livre, en veillant bien sûr à éviter toute ambiguïté.

1.2.2 Risque

La notion de risque est une notion très large, pour laquelle de multiples définitions existent, selon le domaine et même au sein d'un même domaine. Dans le contexte nucléaire, l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), dans son Glossaire de sûreté [33], propose et commente quatre définitions, plus ou moins quantitatives. Pour ce livre, soulignons que :

- la notion de risque recouvre deux caractéristiques distinctes de l'évènement redouté : sa probabilité d'occurrence et ses conséquences (cette notion étant elle-même multiple : conséquences potentielles, réelles ou perçues) ;
- pour la sûreté-criticité, l'évaluation du risque n'est pas quantitative ;
- le k_{eff} ne mesure pas le risque (cf. section 20.7.6).

4. L'accident de Tchernobyl en 1986 est un accident de réactivité.

1.3 Sûreté-criticité

Un des pionniers de la criticité américaine a proposé la définition suivante pour la sûreté-criticité [36] : *« L'art et la science de ne pas construire un réacteur nucléaire sans écran de protection, ni fluide de refroidissement, ni système de contrôle. »* La négation présente dans cette définition est importante ! Celle-ci renvoie à une science, principalement la neutronique, qui sera développée dans les parties IV et VI. Elle souligne également que c'est un art, car comme le lecteur de ce livre s'en apercevra, certains aspects de la sûreté-criticité, notamment la notion de marge développée dans la section 20.7.6, ne peuvent pas ne relever que de considérations purement scientifiques, en particulier dès lors que la sûreté dépend d'actions humaines.

Une définition plus réglementaire peut être donnée au terme « sûreté-criticité », à savoir *« l'ensemble des dispositions techniques et organisationnelles prévues pour assurer la maîtrise du risque de criticité »* [47]. Cette définition introduit les deux principaux types de dispositions : techniques, (c'est-à-dire portant sur la conception d'équipements s'appuyant sur les phénomènes physiques tels que la neutronique, la gravité et/ou sur des actions automatiques) et organisationnelles (liées à l'activité humaine, par exemple des opérations et des contrôles réalisés par des opérateurs) qui sont retenues, en pratique, pour maîtriser ce risque. Le terme « maîtrise » englobe, quant à lui, la prévention du risque de criticité (chapitre 20) et la limitation des conséquences d'un éventuel accident de criticité (chapitre 21).

1.4 Criticien

Enfin, le terme « criticien » désigne usuellement, au sens large, les personnes qui travaillent dans le domaine de la sûreté-criticité. Ce dernier étant vaste et en interface avec de nombreuses autres disciplines, la définition de « criticien » est différente en fonction des organisations, des époques et des personnes elles-mêmes se revendiquant ou non comme tel. De façon plus restreinte, ce terme est employé dans la décision ASN [47] sous la forme d'« ingénieur criticien », dont la définition est *« une personne ayant reçu une formation qualifiante en sûreté-criticité »*, la décision ASN précisant également le rôle de ces ingénieurs criticiens dans l'organisation des exploitants (cf. chapitre 30). De façon courante (et antérieure à la décision ASN), le terme d'ingénieur criticien de centre (ICC) est utilisé pour désigner ces ingénieurs criticiens. La principale formation qualifiante en sûreté-criticité en France s'intitule notamment « formation ICC », le terme « ICC » pouvant alors également désigner toute personne ayant suivi avec succès cette formation, sans pour autant exercer la fonction d'ingénieur criticien au sens de la décision ASN.

Chapitre 2

Introduction au risque de criticité

2.1 Conséquences d'un accident de criticité

Pour caractériser le risque de criticité, commençons par introduire rapidement les conséquences de tels accidents, qui seront développés dans la partie VII et le chapitre 21.

Le danger associé à un accident de criticité résulte du très grand nombre de fissions généré au cours de la réaction en chaîne. Les conséquences d'un accident de criticité découlent donc des caractéristiques du processus de fission, qui seront approfondies dans la section 4.1.

La première caractéristique du processus de fission est la libération d'énergie, principalement sous forme thermique (et qui se manifeste alors par l'élévation de la température du milieu). Cette libération d'énergie peut également constituer un « moteur » pour mobiliser (c'est-à-dire mettre en suspension) la matière fissile présente dans l'équipement, siège de l'accident de criticité, et entraîner une dispersion (dans l'installation concernée, voire en dehors).

L'accident de criticité génère également des produits de fission (PF), pour certains gazeux ou volatils, qui vont sortir de l'équipement, siège de l'accident de criticité, et ainsi possiblement induire des doses, soit par irradiation externe, soit par contamination interne (inhalation principalement).

Enfin, et surtout, le processus de fission libère des neutrons et des rayonnements, gamma notamment, qui vont irradier très fortement les personnes situées à proximité. L'étude des accidents de criticité, principalement basée sur des expérimentations et sur le retour d'expérience (REX) des accidents passés, respectivement développés dans la partie VII et la section 21.1, montre que les conséquences liées au dégagement d'énergie et au relâchement des PF ne constituent pas le danger le plus important : les doses induites par le rejet en cas d'accident de criticité sont très en deçà des doses

reçues par irradiation directe lors d'un tel accident (et sont également bien plus faibles que les doses dues à des rejets dans le cadre d'un accident de fusion de cœur de réacteur nucléaire). En particulier, lors des accidents passés, certains opérateurs ont pu recevoir des doses (cf. section 3.2) dues à l'irradiation allant jusqu'à une centaine de grays pour le corps entier, avec pour conséquence leur décès en quelques jours. Les rapports sur ces accidents font état, au niveau mondial, d'une vingtaine de morts et d'une centaine d'irradiations importantes ayant entraîné des complications médicales (amputations, cataractes, etc.), alors qu'aucune conséquence significative liée à la dispersion de matières radioactives n'a été observée [1].

En première approche, pour définir la « zone de danger » des conséquences dosimétriques en cas d'accident de criticité, un ordre de grandeur du kilomètre autour du siège de l'accident en champ libre peut être retenu, la présence de structures de génie civil contribuant à la réduire. Aussi, l'accident de criticité affecte significativement et principalement le personnel de l'installation concernée, voire des installations voisines d'un même site nucléaire. L'impact à l'extérieur du site, sur le public et l'environnement, est généralement limité.

Le retour d'expérience des soixante accidents de criticité répertoriés dans le monde depuis 1945 [267] montre également la très grande variabilité, diversité et imprévisibilité de ces accidents. En effet, les accidents de criticité ont pu survenir avec tout type de matières fissiles (plutonium, uranium à toutes les isotopies, y compris avec de l'uranium naturel). De même, eu égard à la cinétique de développement d'un accident de criticité, il n'existe généralement pas de signe précurseur exploitable de ce type d'accident, ce qui fait qu'en pratique, toute évacuation préventive fiable avant que celui-ci ne survienne est illusoire.

En termes de durée, une fois la configuration critique établie, l'accident ne s'arrêtera que si cette configuration est modifiée. Dans certains cas, l'accident n'aura duré que quelques secondes, les conséquences de l'accident ou une action réflexe de l'opérateur ayant conduit à son arrêt quasi immédiat. D'autres accidents, au contraire, se sont prolongés sur une période de plusieurs heures, voire de plusieurs jours, un délai nécessaire pour analyser la situation et intervenir afin de l'arrêter. Enfin, les accidents de criticité ont eu lieu durant des périodes et dans des lieux très divers, pas nécessairement ceux anticipés par les criticiens.

Compte tenu des conséquences immédiates et fréquemment létales des accidents de criticité, la maîtrise du risque de criticité repose avant tout, et plus que pour d'autres risques, sur la prévention. D'ailleurs, certaines définitions de la sûreté-criticité, en particulier celle présente dans la norme américaine ANSI/ANS 8.1, mettent en avant ce point : « *Nuclear critica-*

1. Certaines expériences d'accident de criticité ont néanmoins conduit à une dispersion significative dans le local d'expérimentation, sans conséquence en raison de l'absence de personnel présent (cf. l'expérience CRAC 44 à la section 16.3.6 par exemple).

lity safety : protection against the consequences of a criticality accident, preferably by prevention of the accident[2] ».

2.2 Quand y-a-t-il un risque de criticité ?

Le risque de criticité existe dès lors que des matières fissiles sont mises en œuvre dans le cycle du combustible nucléaire. Les noyaux fissiles les plus répandus sont l'uranium 235, le plutonium 239 et le plutonium 241. Mais il en existe d'autres, décrits au chapitre 24. Les différentes étapes du cycle du combustible nucléaire sont décrites dans la partie X. Il est d'ores et déjà possible d'indiquer que, excepté pour les mines d'extraction d'uranium et les étapes de conversion du minerai d'uranium, le risque de criticité est présent à toutes les étapes du cycle du combustible. L'autre cas particulier concerne le cœur d'un réacteur nucléaire, conçu pour être critique, voire légèrement surcritique, cas qui n'est pas traité par les criticiens mais par des spécialistes de la physique des réacteurs (cf. section 2.4).

Pour appréhender la vraisemblance du risque de criticité, voici quelques exemples :

— un réacteur nucléaire REP de puissance 1 450 MWe en France renferme 205 assemblages, chaque assemblage comportant 264 crayons combustibles, soit un total de 54 120 crayons : un accident de criticité est envisageable dans l'eau avec moins de 200 crayons neufs (enrichis à 4 % en isotope ^{235}U). De façon contre-intuitive, un assemblage REP (initialement complet) immergé dans l'eau dont on enlève des crayons peut devenir critique !

— pour fabriquer un assemblage, environ 500 kg d'UO_2 sont nécessaires : un accident de criticité est envisageable avec environ 60 kg d'UO_2 mélangé avec de l'eau ;

— une fois sorti du réacteur, un assemblage irradié contient environ 1 % de Pu (soit 4 kg) : un accident de criticité est envisageable avec moins de 1 kg de plutonium sous forme liquide. Le recyclage d'un seul combustible, pourtant « usé » en réacteur, est ainsi suffisant pour déclencher un accident de criticité.

Ces quelques exemples nous montrent que les quantités de matières fissiles manipulées dans le cycle du combustible sont largement suffisantes pour qu'un accident de criticité puisse survenir. Les conditions dans lesquelles celui-ci est possible sont déterminées par le domaine technique nommé « neutronique ». Au-delà des aspects théoriques de la neutronique, développés dans la partie IV, les paramètres « tangibles »[3] ayant une influence sur le bilan neutronique sont développés dans la partie V et serviront

2. En français, « Sûreté-criticité : protection contre les conséquences d'un accident de criticité, de préférence par la prévention de l'accident. »

3. Du latin « tangibilis » : qu'on peut toucher.

pour prévenir le risque de criticité, selon une démarche qui sera présentée dans la partie VIII.

2.3 Sûreté-criticité et défense en profondeur

La défense en profondeur [33] est la *mise en place hiérarchisée de différents niveaux d'équipements et de procédures variés pour prévenir la multiplication des incidents de fonctionnement prévus et maintenir l'efficacité des barrières physiques placées entre une source de rayonnements ou des matières radioactives et les travailleurs, les personnes du public ou l'environnement, dans différentes conditions de fonctionnement et, pour certaines barrières, dans des conditions accidentelles.*

La défense en profondeur *est essentiellement mise en œuvre à travers un ensemble de niveaux de protection consécutifs et indépendants dont la défaillance entraîne des effets nocifs à des personnes ou à l'environnement. En cas de défaillance d'un niveau ou d'une barrière de protection, le niveau ou la barrière suivant prend le relais. Bien appliquée, la défense en profondeur empêche une défaillance technique, humaine ou organisationnelle de provoquer seule des effets nocifs, et réduit la probabilité des combinaisons de défaillances susceptibles d'entraîner des effets nocifs importants à un très faible niveau. L'efficacité indépendante des différents niveaux de défense est un élément nécessaire de la défense en profondeur.*

Selon l'arrêté du 7 février 2012 fixant les règles générales relatives aux installations nucléaires de base, la défense en profondeur se décline en quatre niveaux :

1. *prévenir les incidents ;*
2. *détecter les incidents et mettre en œuvre les actions permettant, d'une part, d'empêcher que ceux-ci ne conduisent à un accident et, d'autre part, de rétablir une situation de fonctionnement normal ou, à défaut, d'atteindre puis de maintenir l'installation dans un état sûr ;*
3. *maîtriser les accidents n'ayant pu être évités ou, à défaut, limiter leur aggravation, en reprenant la maîtrise de l'installation afin de la ramener et de la maintenir dans un état sûr ;*
4. *gérer les situations d'accident n'ayant pas pu être maîtrisées de façon à limiter les conséquences notamment pour les personnes et l'environnement.*

Le concept de défense en profondeur constitue ainsi, depuis les années 1960, le modèle de sûreté retenu pour les réacteurs nucléaires. Ce modèle a, par la suite, été étendu aux installations du cycle du combustible. Néanmoins, concernant la maîtrise du risque de criticité dans ces installations, la démarche française se basait historiquement sur une règle fondamentale de sûreté (RFS) dédiée (RFS I.3.c de 1984, cf. section 29.4), reprenant les deux

volets « prévention » et « limitation des conséquences » de la défense en profondeur, mais sans la décliner en « niveaux ». La sûreté-criticité présente en effet des spécificités vis-à-vis de ces niveaux, décrites ci-après.

Pour ce qui concerne les niveaux 1 et 2, la matière fissile se présente sous des formes très diverses (solide, liquide ou gazeuse, homogène ou hétérogène, pure ou mélangée à d'autres matières, etc.) et elle est mise en œuvre dans des procédés industriels variés visant à la transformer. En raison de cette diversité, la définition des anomalies de fonctionnement à prévenir constitue en soi une tâche complexe. Par ailleurs, contrairement aux réacteurs nucléaires, lors des opérations du cycle du combustible, l'approche éventuelle de l'état critique ne fait l'objet ni d'une surveillance, ni de moyens de contrôle directs (barres de contrôle, par exemple). Cela conduit à concentrer les efforts sur ces deux premiers niveaux : les dispositions de prévention du risque de criticité et la surveillance de leur bonne application. La notion de marges de sûreté par rapport à l'état critique est alors fondamentale. Ces marges doivent notamment prendre en compte les hypothèses retenues pour la modélisation des situations de fonctionnement, les scénarios étudiés, les marges opérationnelles, ainsi que la qualification des outils de calcul. La mise en œuvre de ces deux premiers niveaux repose alors sur l'application d'un principe dit de « double éventualité » présenté dans la section 20.6.

Concernant le niveau 3, compte tenu de la phénoménologie et des conséquences d'un accident de criticité (cf. partie VII et chapitre 21), celui-ci ne peut pas être considéré comme un accident de dimensionnement [4] dans les installations. Aussi, dans une approche de la défense en profondeur centrée exclusivement sur le risque de criticité, l'application du niveau 3 n'est pas envisageable. En revanche, dans une vision globale de la sûreté de l'installation, il peut être considéré que la maîtrise d'un autre accident de dimensionnement, quel qu'il soit (séisme, incendie, etc.), passe par le maintien d'un état sous-critique (afin de ne pas compromettre la maîtrise de cet accident de dimensionnement ou la limitation de son aggravation [5]). Dans cette perspective, le principe de double éventualité s'applique également à ce troisième niveau. C'est cette approche globale de la sûreté qui a été historiquement retenue.

Enfin, le niveau 4 correspond à la gestion d'une crise avérée, qu'il s'agisse d'un accident de criticité ou d'une situation accidentelle susceptible d'y conduire. Il s'agit alors, pour les différents intervenants – en particulier l'exploitant –, de diagnostiquer la situation et de pronostiquer son évolution, afin de mettre en œuvre les mesures appropriées pour limiter les conséquences sur les populations et rétablir un état sûr. Cela suppose, en

4. Accident postulé donnant lieu à des conditions accidentelles auxquelles une installation est conçue pour résister conformément à des critères de conception spécifiés et à une méthodologie prudente, et dans lesquelles les rejets de matières radioactives sont maintenus dans des limites acceptables [33].

5. Impossibilité d'intervenir à proximité d'un incendie en cas d'accident de criticité concomitant, par exemple.

amont, d'avoir défini et mis en place les moyens de détection d'un tel accident, ainsi que les dispositions permettant d'en limiter les conséquences, notamment pour les travailleurs.

2.4 Comparaison entre la sûreté-criticité et la physique des réacteurs

La sûreté-criticité et la physique des réacteurs partagent la même discipline scientifique, la neutronique, qui est « *l'étude du cheminement des neutrons à l'état libre entre leur émission par une réaction nucléaire et leur absorption par la matière* » [329]. Néanmoins, la sûreté-criticité correspond au domaine d'application de la neutronique aux systèmes ou configurations conçus pour rester sous-critiques (c'est-à-dire les laboratoires et usines du cycle du combustible nucléaire ainsi que les transports de matières fissiles). Pour ces systèmes, l'atteinte ou le dépassement de l'état critique constituerait une anomalie pouvant avoir des conséquences graves pour les travailleurs, la population et l'environnement. La physique des réacteurs correspond, quant à elle, au domaine d'application de la neutronique au cœur d'un réacteur nucléaire, qui est conçu, par définition, pour être critique, voire légèrement surcritique. Les différences entre la sûreté-criticité et la physique des réacteurs vont ainsi concerner :

— les types de milieux et configurations rencontrées ainsi que les anomalies envisageables : les réacteurs nucléaires sont principalement composés de crayons ou de plaques dans l'eau (ou un autre caloporteur), alors que la sûreté-criticité concerne l'ensemble du cycle du combustible, donc la matière fissile sous toutes ces formes (liquides, poudres, crayons, métal, etc.). Dans un réacteur en fonctionnement, les configurations sont relativement figées du fait des caractéristiques du cœur, alors que dans le cycle du combustible, la matière fissile est « en mouvement », avec souvent des transformations, ce qui démultiplie le nombre d'équipements et les possibilités d'anomalies ;

— les systèmes de mesure et détection : les réacteurs sont équipés de moyens de mesure permettant de suivre l'évolution de la puissance ou de détecter une éventuelle anomalie ; dans les installations du cycle, ces systèmes n'existent pas en raison du très grand nombre de configurations possibles et du fait qu'en fonctionnement normal, il n'y a pas de réaction de fission en chaîne ;

— les systèmes de protection : dans un réacteur en fonctionnement, les opérateurs sont loin de la matière fissile puisque celle-ci est contenue dans une cuve (remplie d'eau pour des réacteurs à eau légère), elle-même positionnée dans le bâtiment réacteur sans présence de personnel ; en sûreté-criticité, les opérateurs peuvent être au contact de la

matière ou derrière de faibles protections en cas d'accident de criticité (cf. figure 20.2, par exemple) ;

— les systèmes d'arrêt : les réacteurs sont équipés de moyens de contrôle et d'arrêt de la réaction de fission en chaîne à travers les barres de contrôle en collaboration avec les systèmes de détection ; rien de tel dans les installations du cycle du combustible où, compte tenu des flux de matières et des procédés mis en œuvre, de tels systèmes installés à demeure seraient très certainement inefficaces [6] en raison des multiples scénarios pouvant conduire à l'accident et très coûteux compte tenu du nombre d'équipements faisant transiter de la matière fissile dans une installation.

La frontière entre sûreté-criticité et physique des réacteurs réside dans le caractère intentionnel ou non de la recherche de la criticité (c'est-à-dire l'état critique) et les conséquences qui peuvent survenir en cas d'atteinte ou de dépassement involontaire de celle-ci (présence de personnels, moyens de détection/arrêt, etc.). Ainsi, par exemple, le chargement des assemblages combustibles dans un cœur de réacteur à eau pressurisée (REP) fait partie du domaine de la sûreté-criticité, car la situation critique n'est pas recherchée pour cette opération, il n'y a pas de moyens d'arrêt et la cuve est ouverte avec la présence potentielle de personnel au-dessus du cœur. En revanche, les essais physiques liés au démarrage d'un cœur font partie du domaine de la physique des réacteurs, car même si, de façon involontaire, la criticité était dépassée lors d'une des étapes devant être normalement sous-critiques, l'absence de personnel à proximité ainsi que la présence de systèmes de détection et d'arrêt limitent les conséquences d'un dysfonctionnement de ce système (conçu pour être critique). La frontière précise est donnée dans la réglementation et/ou par la jurisprudence en fonction du type de cœur – REP, réacteurs de recherche, propulsion nucléaire navale (PN).

2.5 Comparaison entre la sûreté-criticité et la radioprotection

La radioprotection est la protection contre les rayonnements ionisants, c'est-à-dire « *l'ensemble des règles, des procédures et des moyens de prévention et de surveillance visant à empêcher ou à réduire les effets nocifs des rayonnements ionisants produits sur les personnes, directement ou indirectement, y compris par les atteintes portées à l'environnement* » (ar-

6. De rares exceptions existent, en particulier pour un système expérimental aujourd'hui démantelé pour lequel une tuyauterie était disposée, prête à injecter une solution contenant un poison neutronique en cas d'accident de criticité. Ceci était rendu possible par le fait que seule cette cuve présentait un risque d'accident de criticité et que les scénarios identifiés impliquaient tous un surchargement de matière fissile pour lequel l'injection de cette solution contenant un poison neutronique aurait été efficace.

ticle L. 591-1 du code de l'environnement). Un accident de criticité produisant (indirectement) des rayonnements ionisants, il pourrait être tentant, au sens strict, de considérer la sûreté-criticité comme une branche de la radioprotection.

La différence réside dans le fait que, pour ce qui concerne la radioprotection, la radioactivité est prédictible et immuable : elle est déterminée par des propriétés intrinsèques (période radioactive, énergie) des noyaux radioactifs. Par exemple, l'activité d'une source de ^{137}Cs (de période radioactive 30,108 ans) ne peut pas être modifiée, ni l'énergie des rayonnements gamma qu'elle produit (un photon de 661,6 keV produit dans 85 % des désintégrations). Il est possible de se protéger de cette source en utilisant un des principes de la radioprotection pour limiter les doses reçues, à savoir le concept temps–écran–distance (TED). Afin de minimiser les doses reçues d'une source radioactive, le temps d'utilisation de celle-ci sera réduit, des écrans (par exemple, du plomb pour les émetteurs gamma) seront interposés pour absorber les rayonnements avant qu'ils n'atteignent les individus exposés, et une distance aussi grande que possible entre la source et ces derniers sera également maintenue.

En sûreté-criticité, la différence majeure réside dans le fait que le processus de fission est altéré par l'environnement : l'existence d'un rayonnement délétère nécessite l'atteinte de l'état critique, dont les conditions varient selon de nombreux paramètres. L'intensité de ce rayonnement dépend elle aussi de ces paramètres. Le principe est alors d'agir sur la « source » afin de prévenir tout déclenchement d'une réaction de fission en chaîne persistante (principe précisé par l'article 3.1.1 de la décision ASN, par exemple). En revanche, afin de limiter les conséquences d'un accident de criticité, les principes retenus en radioprotection pour limiter l'exposition, à savoir le concept « TED », seront utilisés (cf. chapitre 21 et le troisième alinéa de l'article 2.2 de cette même décision), en plus d'agir sur la source pour arrêter la réaction de fission en chaîne.