

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 réac- teurs	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 intégrro-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_m^2 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 neu-	
	tronique	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 (<i>Inhour equation</i>)	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 $V_{\text{mod}}/V_{\text{fissile}}$ 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 Tokai-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