

Table des matières

Avant-propos et remerciements	xv
L’auteur	xvii
Introduction : une approche système simplifiée pour aborder la maîtrise des situations accidentelles	1
Chapitre 1. Physique et sûreté : introduction aux familles d’accidents	
1.1. Risque sur les trois barrières de confinement, notion de fonctions de sûreté	7
1.1.1. Principe des trois barrières	9
1.1.2. Phénomènes à risque pour la première barrière et critères de sûreté associés.....	11
1.1.3. Intégrité des barrières par le respect des trois fonctions de sûreté	16
1.2. Accidents affectant la fonction de sûreté : contrôle de la réactivité	16
1.2.1. Quelques rappels de base de cinétique des réacteurs	17
1.2.2. Paramètres influant la réactivité : accidents de réactivité et effet des contre-réactions neutroniques.....	19
1.2.3. Intervention du système de protection : l’AAR.....	22
1.2.4. Situations envisagées avec défaillance du système d’arrêt automatique	25
1.2.5. Moyens d’apport du bore soluble dans le cœur, en situation accidentelle.....	25
1.3. Accidents affectant la fonction de sûreté : évacuation de la puissance	26
1.3.1. Origine de la puissance thermique primaire	26
1.3.2. Évacuation de la puissance en régime permanent et en transitoire	28
1.3.3. Dégradation de l’inventaire en masse primaire, risque de découverture du cœur et de perte de la sous-fonction « extraction de la puissance »	30

1.3.4.	Perte de la sous-fonction « transport » de la puissance vers les générateurs de vapeur	37
1.3.5.	Perte de la fonction des générateurs de vapeur, source froide pour le cœur	39
1.4.	Accidents affectant la fonction de sûreté : confinement, assuré par la troisième barrière.....	47
1.5.	Systèmes supports : le cas des systèmes fluides RRI/SEC et des alimentations électriques.....	49
1.6.	Synthèse sur la gestion des fonctions de sûreté en accidentel	52
1.7.	Exercices de fin de chapitre.....	53

Problème

P1.	Étude de la perte totale de l'alimentation en eau des GV (H2)	56
-----	---	----

Gestion des accidents affectant les trois fonctions de sûreté

Chapitre 2. Les accidents d'insertion de réactivité par retrait d'absorbants

2.1.	Présentation générale	59
2.2.	Les transitoires d'extraction de grappes d'absorbants	60
2.2.1.	L'accident d'éjection d'une grappe de régulation	61
2.2.2.	Retrait de groupes d'absorbants, états sous-critique et en puissance.....	65
2.2.3.	Cas du retrait d'une grappe de régulation en puissance.....	67
2.3.	Les transitoires de dilution du fluide primaire.....	68
2.3.1.	Dilution homogène.....	68
2.3.2.	Dilution hétérogène	74

Problèmes

P2.	Étude de l'éjection de grappe	76
P3.	Dilution homogène, avec défaillance matérielle et humaine	78

Chapitre 3. L'accident de Rupture de Tuyauterie Vapeur (RTV) : insertion de réactivité par refroidissement primaire

3.1.	Présentation générale	81
3.1.1.	Définition, risque pour les trois barrières.....	81
3.1.2.	Moyens de protection et de sauvegarde chaudière	82
3.1.3.	Hypothèses d'études, type Rapport de Sûreté.....	82
3.2.	Description d'un transitoire de Rupture de Tuyauterie Vapeur	83
3.2.1.	Phase d'action des automatismes.....	84
3.2.2.	Chronologie du transitoire type : phase court terme	86
3.2.3.	Actions de conduite requises	86
3.2.4.	Conséquences pour le cœur	87
3.3.	Étude de sensibilité des principaux paramètres	89
3.3.1.	Localisation de la brèche	90
3.3.2.	Effet de la taille de la brèche secondaire.....	90

3.3.3.	État initial de la tranche.....	90
3.3.4.	Effet du démarrage de la Fonction de Borication Automatique...	91
3.3.5.	Défaillance de l'isolement vapeur.....	91
3.3.6.	Cas d'une RTV sur un 900 MWe.....	92

Problème

P4.	Étude systémique d'une RTV.....	93
-----	---------------------------------	----

Chapitre 4. L'Accident de Perte de Réfrigérant Primaire (APRP)

4.1.	Présentation générale de l'APRP.....	97
4.1.1.	Classification selon la taille de brèche.....	97
4.1.2.	Effet de la localisation de la brèche.....	99
4.1.3.	Rappels sur les moyens de protection et de sauvegarde.....	100
4.1.4.	Règles d'études et critères d'acceptation.....	101
4.2.	Brèche intermédiaire.....	102
4.2.1.	Phase d'actions des automatismes.....	102
4.2.2.	Chronologie et courbes d'un scénario type brèche intermédiaire	104
4.2.3.	Actions de conduite requises.....	106
4.3.	La grosse brèche.....	108
4.3.1.	Phase d'actions des automatismes.....	109
4.3.2.	Chronologie et courbes d'un scénario type : rupture guillotine en branche froide.....	113
4.3.3.	Le transitoire thermohydraulique pour l'enceinte de confinement	114
4.4.	Cas particulier des brèches en état d'arrêt.....	114
4.4.1.	Brèche sous le permissif P11.....	115
4.4.2.	Brèche dans les états sur RRA.....	116
4.4.3.	Perte du RRA à la Plage de Travail Basse du RRA.....	116
4.4.4.	Conclusion pour les brèches dans les états d'arrêt.....	118

Problèmes

P5.	Étude d'une brèche intermédiaire.....	119
P6.	Études probabilistes de la perte du RRA à la PTB RRA.....	120

Chapitre 5. La perte totale des systèmes supports : scénarii de type Fukushima

5.1.	Perte totale des alimentations électriques.....	125
5.1.1.	Conséquences de la perte totale des alimentations électriques...	125
5.1.2.	Stratégies de conduite du réacteur pour divers états initiaux.....	128
5.1.3.	Spécificités de la conduite en circulation naturelle.....	131
5.1.4.	Cas particulier d'une perte totale des alimentations électriques affectant tout le site.....	132
5.2.	Perte totale de la source froide.....	134
5.2.1.	Conséquences de la perte totale de la source froide.....	134
5.2.2.	Stratégies de conduite du réacteur pour divers états initiaux.....	134
5.2.3.	Cas particulier de la perte de la source froide sur l'ensemble des tranches du site.....	137

5.3	Cumul de la perte totale de la source froide et des alimentations électriques	137
5.4	Conclusion.....	138

Problèmes

P7.	Étude des conditions d'échec de l'îlotage.....	139
P8.	Perte totale des alimentations électriques, thermosiphon et conduite « H3 »	140

Chapitre 6. La Rupture de Tubes de Générateur de Vapeur (RTGV)

6.1.	Présentation générale de l'accident.....	145
6.2.	Retour d'expérience mondial et enseignements tirés en France.....	146
6.3.	Description d'un transitoire RTGV type	149
6.3.1.	Phase d'intervention des automatismes	149
6.3.2.	Stratégie de conduite court terme	153
6.3.3.	Stratégie de conduite long terme	156
6.4.	Étude de sensibilité aux principaux paramètres.....	159
6.4.1.	Niveau de puissance initial	159
6.4.2.	Disponibilité des GMPP.....	160
6.4.3.	Nombre de tubes ruptés	160
6.4.4.	RTGV + cumul du blocage des soupapes de sûreté (brèche vapeur sur le même GV).....	160

Problème

P9.	Étude de la conduite court terme d'une RTGV – gestion du RIS.....	162
-----	---	-----

L'accident de TMI2 et ses enseignements en termes de gestion post-accidentelle

Chapitre 7. L'accident de Three Mile Island (1979)

7.1.	Présentation du réacteur B&W de TMI2	165
7.2.	Chronologie de l'accident : principaux événements et conduite.....	166
7.2.1.	L'initiateur, les aggravants, le découvrage du cœur.....	166
7.2.2.	Les alarmes d'activité, la situation d'urgence, les tentatives pour sauver la situation	171
7.3.	Analyse des conséquences a posteriori	173
7.4.	Principaux enseignements de l'accident de TMI2, sous l'angle de la gestion post-accidentelle	176
7.4.1.	Phénomènes thermohydrauliques	176
7.4.2.	Matériels utilisés en conduite.....	178
7.5.	Prise en compte des facteurs humains et organisationnels par le secteur nucléaire français	179
7.5.1.	La décennie 80 : prise en compte de l'erreur humaine et de son rattrapage par l'organisation	179

7.5.2.	La décennie 90 : prise en compte du facteur organisationnel, émergence du concept de culture de sûreté.....	182
7.5.3.	Aujourd'hui	183

Problème

P10.	Analyse de l'accident de TMI2, jusqu'au découverte du cœur.....	183
-------------	---	-----

Chapitre 8. La conduite post-accidentelle par « Approche Par État »

8.1.	Caractérisation de l'état physique de l'installation (diagnostic d'état)	190
8.2.	Détermination des stratégies de conduite : séquences et modules de conduite.....	192
8.2.1.	Conduite primaire	192
8.2.2.	Conduite secondaire et enceinte.....	195
8.3.	Mise en œuvre des actions de conduite, selon les moyens disponibles	197

Problème

P11.	APE : étude d'un repli dur vers RRA.....	199
-------------	--	-----

Chapitre 9. Situations post-fusion du cœur et conséquences sur le confinement

9.1.	Physique de la fusion du cœur, jusqu'au percement de la cuve.....	201
9.1.1.	Perte de la première barrière	202
9.1.2.	Oxydation des gaines et production d'hydrogène.....	202
9.1.3.	Dégradation du cœur aux hautes températures, formation du corium et percement de la cuve.....	204
9.2.	Modes de défaillance de l'enceinte de confinement suite au percement de la cuve.....	205
9.2.1.	Défaut d'étanchéité initial de l'enceinte.....	208
9.2.2.	Mise en surpression lente dans l'enceinte.....	208
9.2.3.	Explosion de vapeur dans la cuve ou dans le puits de cuve	210
9.2.4.	Explosion d'hydrogène dans l'enceinte	211
9.2.5.	Traversée du radier en béton par le corium	212
9.2.6.	Bipasse du confinement par l'intermédiaire de tuyauteries sortant de l'enceinte (mode V)	213
9.2.7.	Échauffement direct de l'enceinte	214
9.2.8.	By-pass enceinte par RTGV	214
9.2.9.	Accidents d'insertion rapide de réactivité.....	214
9.3.	Conduite des accidents graves et mesures de protection des populations..	215
9.4.	Réexamen de sûreté sur la base des Études Probabilistes de Sûreté (EPS) de niveau 2.....	216
9.5.	Conclusion.....	218

Problème

P12.	Étude de la tenue de l'enceinte en cas d'accident grave.....	218
-------------	--	-----

Chapitre 10. Conclusion : quelques pistes pour maîtriser les situations accidentelles sur le système REP

10.1. L'analyse des interactions et contre-réactions internes au système complexe.....	221
10.2. La prise en compte de la problématique principale de sûreté : l'évacuation de la puissance.....	223
10.3. L'importance du retour d'expérience et du réexamen périodique de sûreté	225
10.4. L'enseignement du retour d'expérience : les accidents ont des origines techniques, humaines et organisationnelles.....	226
10.5. Se préparer à l'imprévu	227
10.6. Se préparer à la gestion des accidents graves et des rejets	228
10.7. L'évolution de conception des futures installations doit intégrer ces enseignements.....	228
10.8. Toujours plus de sûreté ?	230

Annexe 0. Compléments de thermohydraulique système

A0.1. Physique des composants du circuit primaire – grandeurs clés mesurées ..	231
A0.1.1. Niveau et pression dans le pressuriseur.....	231
A0.1.2. Niveau des générateurs de vapeur	235
A0.2. Circulation du fluide primaire : la sous-fonction transport	236
A0.2.1. Caractéristiques circuit et pompe - point de fonctionnement en circulation forcée	236
A0.2.2. Arrêt partiel des pompes - circulation forcée dissymétrique	237
A0.2.3. Circulation naturelle monophasique.....	238
A0.2.4. Circulation naturelle diphasique	240
A0.2.5. Fonctionnement en mode caloduc.....	242
A0.2.6. Conclusion sur la sous-fonction transport	243
A0.2.7. Conditions de création d'une hétérogénéité du fluide primaire (ex. : en bore).....	243

Annexe 1. Approches déterministe et probabiliste de sûreté

A1.1. L'approche déterministe de sûreté.....	247
A1.1.1. Risque potentiel, risque résiduel	247
A1.1.2. Situations de fonctionnement – classement en catégories	247
A1.1.3. Conditions de sûreté à respecter pour chaque situation – critères d'acceptabilité des études	250
A1.1.4. Règles d'études et codes conservatifs	251
A1.1.5. Informations tirées des études des situations de fonctionnement	252
A1.1.6. Situations complémentaires	253
A1.1.7. Le rapport de sûreté.....	254
A1.2. Les études probabilistes de sûreté	254
A1.2.1. Principe des arbres d'évènements	254
A1.2.2. Intérêt et limites	255
A1.2.3. Utilisation des EPS.....	256

Annexe 2. Les accidents de Tchernobyl et Fukushima

A2.1. L'accident de Tchernobyl	259
A2.1.1. Une filière dangereuse : un réacteur potentiellement instable....	259
A2.1.2. Présentation succincte de l'accident et de ses causes organisationnelles.....	261
A2.1.3. Enseignements tirés pour les RBMK et les réacteurs occidentaux	263
A2.2. L'accident de Fukushima	264
A2.2.1. Le site et les réacteurs de Fukushima.....	264
A2.2.2. Présentation succincte de l'accident.....	265
A2.2.3. Premiers enseignements.....	268

Annexe 3. Sûreté nucléaire : facteurs humains et organisationnels

A3.1. L'erreur humaine.....	274
A3.2. Origine organisationnelle de l'erreur humaine.....	276
A3.3. Erreurs actives et erreurs latentes	277
A3.4. Le débat « système complexe = accident normal » vs « organisation à haute fiabilité »	278
A3.5. Si l'homme est source d'erreur, faut-il développer l'automatisation ?	280
A3.6. La sûreté gérée pour développer la résilience du système.....	281

Annexe 4. Spécificités de la conception du réacteur EPR vis-à-vis de la sûreté

A4.1. Les choix de conception pour réduire le risque de fusion du cœur.....	285
A4.1.1. Circuits primaire et secondaire.....	286
A4.1.2. Systèmes de sauvegarde.....	287
A4.2. Les choix de conception pour limiter les conséquences d'un accident grave	289
A4.2.1. Élimination pratique des situations qui pourraient conduire à des rejets précoces importants.....	289
A4.2.2. Dispositions relatives à la fusion du cœur à basse pression.....	291
A4.3. Principaux choix de conception des concurrents de l'EPR vis-à-vis de la sûreté.....	293

Annexe 5. Présentation du modèle REP ponctuel : équations bilan et données 1300 MWe

A5.1. Présentation du modèle ponctuel simplifié, exploité pour la résolution d'un problème dynamique sur le système REP	295
A5.2. Équations bilans du modèle.....	297
A5.2.1. Bilan de réactivité du cœur	297
A5.2.2. Bilans de masse	297
A5.2.3. Bilans d'énergie	299
A5.2.4. Augmentation du volume du fluide primaire et conséquences sur la pression primaire	303
A5.3. Données numériques caractéristiques du système REP	304

A5.3.1. Physique du cœur	304
A5.3.2. Circuits primaire et secondaire.....	306
A5.3.3. Systèmes fluides auxiliaires et de sauvegarde	308
A5.3.4. Propriétés thermohydrauliques de l'eau	310
Lexique des principaux sigles et grandeurs physiques	311
Principales références bibliographiques	315