

# Sommaire

---

<b>Préface</b> .....	III
<b>Liste des sigles</b> .....	V
<b>Avant-propos</b> .....	XI

## *Chapitre 1* **Introduction**

1.1. Objectifs généraux de l'ouvrage .....	1
1.2. Structure de l'ouvrage .....	3
1.3. Objectifs et démarche de la R&D sur les accidents de fusion du cœur .....	5
1.3.1. Objectifs .....	5
1.3.2. Une R&D de dimension internationale .....	5
1.3.3. Démarche .....	7

## *Chapitre 2* **Conception et fonctionnement d'un réacteur à eau sous pression**

2.1. Généralités sur le fonctionnement d'un réacteur .....	11
2.2. Les réacteurs à eau sous pression du parc électronucléaire français .....	14
2.3. Description d'un réacteur à eau sous pression et de ses principaux circuits ..	19
2.3.1. Présentation générale de l'installation.....	19
2.3.2. Description des principaux constituants d'un REP.....	21
2.4. Fonctionnement du réacteur en situation normale et en situation accidentelle.....	35
2.4.1. Les systèmes utilisés lors du fonctionnement normal du réacteur .....	35

2.4.2. Les systèmes utilisés lors d'un fonctionnement incidentel ou accidentel du réacteur .....	37
2.5. La conduite du réacteur en fonctionnement normal et en situation accidentelle.....	41
2.5.1. Salle de commande .....	41
2.5.2. Conduite du réacteur .....	42
2.6. Conclusion .....	45

### *Chapitre 3*

#### **Principes de la sûreté pour les réacteurs à eau sous pression du parc français**

3.1. Introduction.....	47
3.2. Concept de défense en profondeur .....	48
3.3. Apports de l'approche probabiliste.....	51
3.4. Conclusion.....	53

### *Chapitre 4*

#### **Études et approche de la gestion des accidents graves pour les réacteurs à eau sous pression du parc français**

4.1. Concept d'accident grave .....	55
4.2. Scénarios d'accidents pouvant mener à une fusion du cœur.....	56
4.2.1. Description des scénarios d'accident de l'EPS de niveau 1 .....	56
4.2.2. Fréquences de fusion par type de scénarios déterminées par l'EPS de niveau 1 pour les réacteurs de 900 MWe.....	64
4.2.3. Progression de l'accident au-delà de la fusion du cœur .....	65
4.3. Déroulement général des accidents de fusion du cœur et approche de leur gestion pour les réacteurs en exploitation et pour le réacteur EPR .....	66
4.3.1. Physique de la fusion du cœur et phénomènes associés.....	66
4.3.2. Modes de défaillance de l'enceinte de confinement.....	73
4.3.3. Traitement de l'accident de fusion de cœur pour les REP en exploitation.....	75
4.3.4. L'approche retenue pour le réacteur EPR .....	88
4.4. Les études probabilistes de sûreté de niveau 2 : méthode et enseignements relatifs aux accidents de fusion du cœur .....	94
4.4.1. Modalités de réalisation des études probabilistes de sûreté de niveau 2 .....	95
4.4.2. Les applications des EPS de niveau 2 .....	100
4.4.3. Conclusion sur les EPS de niveau 2 .....	107

*Chapitre 5*  
**Développement de l'accident de fusion du cœur**

5.1. Développement de l'accident dans la cuve du réacteur .....	109
5.1.1. Progression de la fusion des matériaux du cœur dans la cuve .....	109
5.1.2. Comportement du corium au fond de la cuve .....	120
5.1.3. Défaillance de la cuve .....	130
5.1.4. Fusion du cœur en pression .....	137
5.2. Phénomènes pouvant entraîner une défaillance précoce de l'enceinte .....	157
5.2.1. Échauffement direct des gaz de l'enceinte .....	157
5.2.2. Risques associés à l'hydrogène et moyens de limitation des conséquences .....	173
5.2.3. Explosion de vapeur .....	190
5.3. Phénomènes pouvant mener à une défaillance différée de l'enceinte de confinement : l'interaction corium-béton (ICB) .....	215
5.3.1. Introduction .....	215
5.3.2. Phénomènes physiques mis en jeu .....	215
5.3.3. Programmes expérimentaux .....	218
5.3.4. Modélisation et logiciels de simulation .....	224
5.3.5. Applications au cas d'un réacteur de puissance .....	229
5.3.6. Bilan et perspectives .....	233
5.4. Rétention et refroidissement du corium dans la cuve et hors de la cuve .....	238
5.4.1. Rétention du corium dans la cuve .....	238
5.4.2. Refroidissement du corium sous eau au cours d'une interaction corium-béton .....	250
5.4.3. Étalement du corium dans le cas du réacteur EPR .....	259
5.5. Relâchement des produits de fission en cas d'accident de fusion du cœur .....	273
5.5.1. Inventaire et importances relatives des produits de fission .....	274
5.5.2. Relâchements de produits de fission dans la cuve .....	278
5.5.3. Transferts de produits de fission (hors gaz de fission) dans les circuits primaire et secondaire .....	288
5.5.4. Relâchements de produits de fission en dehors de la cuve .....	294
5.5.5. Comportement des aérosols dans l'enceinte de confinement .....	296
5.5.6. Chimie des produits de fission .....	298
5.5.7. Conclusion .....	316

*Chapitre 6***Comportement des enceintes de confinement**

6.1. Introduction.....	323
6.2. Comportement des enceintes dans les situations de dimensionnement .....	325
6.2.1. Enceintes à simple paroi (réacteurs de 900 MWe).....	326
6.2.2. Enceintes à double paroi (réacteurs de 1 300 MWe et de 1 450 MWe).....	328
6.2.3. Enceintes à double paroi des réacteurs EPR.....	330
6.2.4. Contrôle de l'intégrité et de l'étanchéité des enceintes de confinement .....	331
6.3. Comportement mécanique des enceintes en cas d'accident de fusion du cœur.....	334
6.3.1. Introduction.....	334
6.3.2. Comportement mécanique des enceintes des centrales REP de 900 MWe.....	334
6.3.3. Comportement mécanique des enceintes des centrales REP de 1 300 MWe.....	345
6.3.4. Bilan et perspectives concernant les études effectuées à l'IRSN au sujet du comportement mécanique des enceintes de confinement en situation d'accident de fusion du cœur.....	349
6.4. Bypasses de l'enceinte de confinement.....	351
6.4.1. Introduction.....	351
6.4.2. Possibilités de bypasses de l'enceinte de confinement.....	353
6.4.3. Bypasses de l'enceinte de confinement pouvant survenir lors du fonctionnement du réacteur .....	354
6.4.4. Bypasses de l'enceinte de confinement pouvant survenir lors d'un accident de dimensionnement .....	355
6.4.5. Bypasses de l'enceinte de confinement pouvant survenir lors d'un accident de fusion du cœur.....	356
6.5. Conclusion.....	359

*Chapitre 7***Enseignements tirés des accidents de Three Mile Island et de Tchernobyl  
et du programme de recherche Phébus-PF**

7.1. Enseignements tirés de l'accident de Three Mile Island.....	361
7.1.1. Introduction.....	361
7.1.2. Déroulement de l'accident et dégradation du cœur.....	363
7.1.3. Conséquences de l'accident sur l'environnement et la santé du public.....	373

7.1.4.	Enseignements tirés de l'accident concernant la physique des accidents de fusion du cœur.....	374
7.1.5.	Enseignements tirés de l'accident pour la sûreté des centrales nucléaires en France .....	375
7.1.6.	Conclusion.....	380
7.2.	Enseignements tirés de l'accident de Tchernobyl .....	381
7.2.1.	Introduction.....	381
7.2.2.	Déroulement de l'accident, rejets et conséquences .....	382
7.2.3.	Les enseignements tirés en France en termes de sûreté .....	390
7.2.4.	Les enseignements tirés en France en termes de gestion d'une « crise nucléaire » .....	392
7.2.5.	Conclusion .....	393
7.3.	Le programme Phébus-PF.....	393
7.3.1.	Contexte .....	393
7.3.2.	Description de l'installation Phébus-PF et de la grille d'essais .....	394
7.3.3.	Principaux enseignements concernant la dégradation des crayons combustibles .....	397
7.3.4.	Relâchements à partir du cœur.....	401
7.3.5.	Transport des produits de fission et des aérosols dans le circuit primaire .....	405
7.3.6.	Thermohydraulique et comportement des aérosols dans l'enceinte de confinement .....	407
7.3.7.	La chimie de l'iode dans l'enceinte de confinement.....	408
7.3.8.	Utilisation des résultats des essais du programme Phébus-PF dans les études de sûreté .....	411

## *Chapitre 8*

### **La simulation numérique des accidents de fusion du cœur**

8.1.	Logiciels intégraux et logiciels mécanistes .....	417
8.1.1.	Logiciels intégraux.....	418
8.1.2.	Logiciels détaillés.....	421
8.2.	Approche générale du développement et de la validation des logiciels.....	422
8.2.1.	Développement des logiciels .....	422
8.2.2.	Validation des logiciels.....	422
8.3.	ASTEC.....	425
8.3.1.	Capacités du logiciel.....	425
8.3.2.	État de la validation à mi-2013 .....	427
8.3.3.	Perspectives d'évolution du logiciel ASTEC.....	429

8.4. MAAP.....	430
8.4.1. Capacités du logiciel.....	431
8.4.2. État de la validation à mi-2013 .....	433
8.4.3. Perspectives d'évolution du logiciel MAAP.....	434
8.5. MELCOR.....	435

*Chapitre 9*  
**Conclusion**