

CHAPITRE 4 REACTEUR – PHYSIQUE DU COEUR

4.1 DESCRIPTION GÉNÉRALE

4.2 ASSEMBLAGE DE COMBUSTIBLE

4.3 CONCEPTION NEUTRONIQUE

4.4 CONCEPTION THERMO-HYDRAULIQUE DU CŒUR

4.5 CONTRÔLE DE LA RÉACTIVITÉ

4.ANNEXE4 CODES DE CALCUL UTILISÉS DANS LE CHAPITRE 4



RAPPORT DE SURETE

— DE FLAMANVILLE 3 —

Version Publique

Edition DEMANDE DE MISE EN SERVICE

CHAPITRE 4

SECTION 1

PAGE 1/12

CENTRALES NUCLÉAIRES

Palier EPR

SOMMAIRE

.4.1 DESCRIPTION GÉNÉRALE	3
1. DESCRIPTION GÉNÉRALE DU CŒUR ET DES ASSEMBLAGES	
COMBUSTIBLES	3
2. DESCRIPTION GÉNÉRALE DES MOYENS DE CONTRÔLE DE LA	
RÉACTIVITÉ	3
3. OBJECTIF DES ANALYSES DE CONCEPTION NEUTRONIQUES ET	
THERMO-HYDRAULIQUES	4
4. DONNÉES PRINCIPALES	4
5. MÉTHODES ET OUTILS DE CONCEPTION	4
6. CODES DE CALCUL	4



RAPPORT DE SURETE

— DE FLAMANVILLE 3 —

Version Publique

Edition DEMANDE DE MISE EN SERVICE

CHAPITRE 4

SECTION 1

PAGE 2/12

CENTRALES NUCLÉAIRES

Palier EPR

TABLEAUX :

TAB-4.1.1 PARAMÈTRES DE CONCEPTION DU RÉACTEUR¹ 5

**TAB-4.1.2 TECHNIQUES ANALYTIQUES UTILISÉES DANS LA CONCEPTION
DU CŒUR 12**

.4.1 DESCRIPTION GÉNÉRALE

Ce chapitre 4 décrit les caractéristiques nucléaires, hydrauliques et thermiques du réacteur, les hypothèses relatives aux caractéristiques mécaniques des assemblages combustibles retenues pour la conception du réacteur EPR, et l'objectif des études neutroniques et thermo-hydrauliques.

1. DESCRIPTION GÉNÉRALE DU CŒUR ET DES ASSEMBLAGES COMBUSTIBLES

Le cœur du réacteur contient un matériau combustible au sein duquel se déroule la réaction de fission qui produit l'énergie.

Tous les équipements du réacteur sont utilisés soit pour supporter physiquement ce matériau fissile, soit pour contrôler la réaction de fission, soit pour canaliser le réfrigérant.

Le cœur du réacteur est constitué d'un certain nombre de crayons combustibles regroupés en faisceaux par des grilles de maintien et des embouts supérieurs et inférieurs. Les crayons combustibles contiennent des pastilles d'oxyde d'uranium empilées dans un tube de gainage  obturé et soudé de manière étanche pour encapsuler le combustible. Les faisceaux, appelés assemblages combustibles, sont disposés selon un schéma qui se rapproche d'un ortho-cylindre.

Un assemblage combustible est composé de 265 crayons combustibles reliés ensemble pour former un réseau à pas carré.

Les 24 positions restantes dans le réseau accueillent des tubes-guides raccordés aux grilles et aux embouts supérieurs et inférieurs. Ces tubes-guides servent à accueillir les grappes de contrôle et les crayons sources, ou sont équipés de bouchons pour limiter le débit de contournement.

Les grilles se présentent sous la forme d'un réseau carré régulier de plaquettes accouplées. Les plaquettes sont équipées de ressorts et de bossettes pour le maintien des crayons combustibles, ainsi que d'ailettes de mélange du réfrigérant.

Le cœur initial est composé de 241 assemblages répartis sur 3 régions avec différents enrichissements.

La gestion du combustible est une gestion UO₂ par tiers de cœur avec recharges de 80 assemblages enrichis à 4,2% en U²³⁵. Un allongement du cycle naturel est possible jusqu'à 70 JEPP.

Le cœur est refroidi et modéré avec de l'eau légère à la pression de 155 bar dans le circuit primaire.

2. DESCRIPTION GÉNÉRALE DES MOYENS DE CONTRÔLE DE LA RÉACTIVITÉ

L'eau du circuit primaire (fluide caloporteur également modérateur) contient du bore soluble agissant comme poison pour les neutrons. Les variations lentes de réactivité (par exemple celles induites par l'épuisement du combustible), sont accommodées par des modifications de cette concentration en bore dans l'eau du circuit primaire. Un poison neutronique supplémentaire (gadolinium), sous la forme de crayons de poison consommable co-broyé avec l'oxyde d'uranium, permet d'ajuster la réactivité initiale et la distribution de puissance du cœur.

La réactivité et la distribution de puissance dans le cœur sont également contrôlées par des grappes de barres de contrôle mobiles composées de crayons absorbants qui permettent de faire varier rapidement la réactivité.

Chaque grappe de contrôle contient un ensemble de crayons absorbants fixés à leur extrémité supérieure à un pommeau commun, l'araignée.

Les grappes de contrôle sont réparties en plusieurs groupes.

Les mécanismes de commande des grappes (RGL) permettent d'insérer, maintenir ou extraire les grappes de contrôle.

Ce sont des dispositifs électromécaniques fixés au couvercle de la cuve du réacteur.

Ils sont utilisés pour contrôler la position des grappes de contrôle et assurer l'arrêt automatique du réacteur par chute gravitaire. L'insertion gravitaire des grappes de contrôle est obtenue en coupant les alimentations électriques des RGL.

3. OBJECTIF DES ANALYSES DE CONCEPTION NEUTRONIQUES ET THERMO-HYDRAULIQUES

Les analyses et évaluations neutroniques de conception définissent l'emplacement physique des grappes de contrôle, des crayons de poison consommables, et les paramètres physiques tels les enrichissements du combustible et la concentration en bore dans l'eau du circuit primaire. L'évaluation neutronique de conception établit que le cœur du réacteur possède des caractéristiques inhérentes qui, considérées conjointement avec les actions correctrices des systèmes de contrôle et de protection du réacteur, assurent un contrôle de la réactivité approprié même si la grappe de contrôle la plus efficace est coincée en position totalement extraite.

L'étude de conception assure également la stabilité inhérente vis-à-vis des oscillations de puissance radiales (et/ou azimutales) et axiales, et prévoit le contrôle des oscillations axiales de puissance induites par l'utilisation des grappes de contrôle.

Les analyses et évaluations thermo-hydrauliques de conception définissent les paramètres du fluide primaire qui assurent un transfert de chaleur adéquat entre le gainage combustible et le réfrigérant. L'étude thermique prend en compte les variations géométriques locales, les sources de puissance, la répartition du débit du fluide, et son mélange. Les ailettes de mélange intégrées aux grilles de maintien des assemblages combustibles permettent un meilleur mélange entre canaux à l'intérieur d'un même assemblage ainsi qu'entre assemblages adjacents. L'instrumentation disposée à l'intérieur et à l'extérieur du cœur contrôle le comportement neutronique, thermo-hydraulique et mécanique du réacteur et fournit des signaux d'entrée aux fonctions de contrôle automatique.

4. DONNÉES PRINCIPALES

Les principaux paramètres neutroniques, thermo-hydrauliques et mécaniques de conception du réacteur sont présentés dans le tableau [TAB-4.1.1](#).

5. MÉTHODES ET OUTILS DE CONCEPTION

Les techniques analytiques utilisées dans la conception du cœur sont présentées dans le tableau [TAB-4.1.2](#).

6. CODES DE CALCUL

La description, la nature et l'objet des codes de calcul utilisés dans la conception du cœur sont présentés dans l'Annexe 4.

TAB-4.1.1 PARAMÈTRES DE CONCEPTION DU RÉACTEUR¹

A – <u>Paramètres thermiques et hydrauliques</u>	
1 – Puissance active du cœur (100%) (MWth)	4300
2 – Nombre de boucles	4
3 – Chaleur générée dans le combustible (%)	97,4
4 – Pression nominale du circuit (bar)	155
5 – Corrélation d'échauffement critique	□
	□
6 – RFTC minimum dans des conditions normales de fonctionnement ($F\Delta H = 1,62$ - $\cos 1,45$)	2,44
7 – RFTC initial minimum pour les analyses de transitoires	(Voir chapitre 15)
B – <u>Débit primaire</u>	
8 – Débit thermo-hydraulique / boucle (m^3/h)	□
9 – Débit de contournement du cœur (%)	5,50
10 – Surface de passage dans le cœur pour le transfert de chaleur (m^2)	5,9
11 – Vitesse moyenne le long des crayons combustibles (m/s)	5
12 – Débit massique moyen dans le cœur ($g/cm^2.s$)	□

1 : Les dimensions sont données à froid (20 °C)

C – Température du réfrigérant

13 – Nominale à l'entrée (°C)	297,1
14 – Augmentation moyenne dans la cuve (°C)	32,6
15 – Augmentation moyenne dans le cœur (°C)	34,3
16 – Moyenne dans le cœur (°C)	315,3
17 – Moyenne dans la cuve (°C)	313,4

D – Transfert de chaleur

18 – Échange primaire/secondaire :

Surface d'échange thermique minimale (m ²)	□
Taux de bouchage des tubes GV maximal (%)	□
19 – Flux thermique moyen dans le cœur (W/cm ²)	52,3
20 – Flux thermique maximal dans le cœur (fonctionnement nominal) (W/cm ²)	150,8
21 – Densité de puissance linéique moyenne (basée sur les dimensions à froid) (W/cm)	156,1
22 – Puissance linéique maximale dans des conditions normales de fonctionnement (W/cm)	450
23 – Consigne de protection vis-à-vis de la puissance linéique maximale (W/cm)	590
24 – Puissance linéique maximale pour la prévention de la fusion au centre de la pastille (W/cm)	> 590
25 – Densité de puissance à chaud (KW/litre de cœur)	□

E – Pertes de pression dans la cuve et le cœur

26 – Cuve du réacteur (bar)

□

27 – Cœur (bar)

□

F – Assemblages combustibles (les dimensions sont données à froid (20°C))

28 – Réseau de crayons

17 x 17

29 – Nombre d'assemblages combustibles

241

30 – Crayons combustibles par assemblage

265

31 – Pas entre assemblages combustibles (cm)

21,504

32 – Longueur de l'assemblage combustible sans les ressorts de maintien (cm)

480,3

33 – Pas du réseau (cm)

1,26

34 – Largeur hors-tout de l'assemblage (cm)

21,4 x 21,4

35 – Poids de combustible par assemblage (kg)

□

36 – Nombre de grilles par assemblage

11

37 – Composition des grilles

□

38 – Nombre de tubes-guides par assemblage

24

39 – Nombre de tubes d'instrumentation par assemblage

0



RAPPORT DE SURETE

— DE FLAMANVILLE 3 —

Version Publique

Edition DEMANDE DE MISE EN SERVICE

CHAPITRE 4

SECTION 1

PAGE 8/12

CENTRALES NUCLÉAIRES

Palier EPR

G – Crayons combustibles (les dimensions sont données à froid (20°C))

40 – Nombre	63865
41 – Diamètre extérieur (mm)	9,50
42 – Jeu diamétral (mm)	0,17
43 – Epaisseur de la gaine (mm)	0,57
44 – Matériau de la gaine	□

H – Pastilles (les dimensions sont données à froid (20°C))

45 – Matériau	UO ₂
46 – Densité de UO ₂ (% de la densité théorique)	96
47 – Diamètre (mm)	8,19

I – Grappes de contrôle noires (les dimensions sont données à froid (20°C))

48 – Absorbant

1) Partie AIC (partie inférieure)

Composition (% massique) :

Ag

□

In

□

Cd

□

Densité (g/cm³)

□

Diamètre extérieur de l'absorbant de 0 à □ (mm)

□

Diamètre extérieur de l'absorbant de □ à □ (mm)

□

Longueur (mm)

□

2) Partie B4C (partie supérieure)

Composition : bore naturel (Pourcentage d'atomes de B10 19,9%)

Densité (g/cm³)

□

Diamètre de l'absorbant (mm)

□

Longueur (mm)

□

49 – Gainage

Diamètre extérieur (mm)

□

Diamètre intérieur (mm)

□

Epaisseur (mm)

□

Matériau

Acier inoxydable

50 – Nombre de grappes noires (dont grappes d'arrêt)

81 (53)

51 – Nombre de crayons absorbants par grappe

24

J – Grappes de contrôle grises (les dimensions sont données à froid (20°C))

52 – Absorbant

1) Crayon absorbant en AIC

Composition (% massique) :

Ag

□

In

□

Cd

□

Densité (g/cm³)

□

Diamètre extérieur de l'absorbant de 0 à □ (mm)

□

Diamètre extérieur de l'absorbant de □ à □ (mm)

□

Longueur (mm)

□

53 – Crayon inerte (acier inoxydable)

Diamètre extérieur (mm)

□

Diamètre intérieur (mm)

□

Longueur (mm)

□

54 – Gainage

Diamètre extérieur (mm)

□

Diamètre intérieur (mm)

□

Epaisseur (mm)

□

Matériau

Acier inoxydable

55 – Nombre de grappes grises

8

56 – Nombre de crayons absorbants par grappe

□

57 – Nombre de crayons inertes par grappe

□

K – Cœur actif (les dimensions sont données à froid (20°C))

58 – Diamètre équivalent (mm)

3767

59 – Hauteur active moyenne de combustible dans le cœur (mm)

4200

60 – Rapport hauteur/diamètre

1,115

61 – Surface transversale totale (cm²)

111 440

L – Réflecteur radial lourd (les dimensions sont données à froid (20°C))

62 – Epaisseur (mm)

Entre 77 et 297 (moyenne
194)

63 – Composition (% volumique)

□ % acier,

□ % eau

M – Enrichissement du combustible

Pour les assemblages combustibles UO₂ (% massique) :

64 – Région 1 du cycle 1

1,4 %

65 – Région 2 du cycle 1

2,3 %

66 – Région 3 du cycle 1

3,2 %

67 – Assemblages neufs pour UO₂ – cycle d'équilibre P5

4,2 %

TAB-4.1.2 TECHNIQUES ANALYTIQUES UTILISÉES DANS LA CONCEPTION DU CŒUR

ANALYSE	TECHNIQUE	CODE INFORMATIQUE
1 – <u>Conception neutronique</u>		
- Sections efficaces et constantes macroscopiques	☐ données macroscopiques	☐
- Distributions de puissance, taux d'épuisement du combustible, concentration en bore critique, distributions de xénon, coefficients de réactivité, efficacités des grappes absorbantes	3D, 2 groupes d'énergie, théorie de la diffusion-évolution	☐
- Criticité dans le bâtiment combustible	Méthode de Monte Carlo	☐
- Chaleur résiduelle	Désintégration des produits de capture U239 et Np239, des produits de fission et des actinides	☐
	Fissions résiduelles dues aux neutrons retardés	☐
- Irradiation de la cuve et échauffement gamma du réflecteur lourd	Propagation de neutrons et de gamma hors du cœur, calculs de transport Sn	☐
2 – <u>Étude thermo-hydraulique</u>	Analyse par sous-canal des conditions locales du fluide (traitement effectué pour le cœur, l'assemblage et le canal chaud)	☐

SOMMAIRE

.4.2 ASSEMBLAGE DE COMBUSTIBLE	4
0. EXIGENCES DE SÛRETÉ	4
0.1. FONCTIONS DE SÛRETÉ	4
0.2. CRITÈRES FONCTIONNELS	4
0.2.1. ÉVACUATION DE LA PUISSANCE RÉSIDUELLE	4
0.2.2. CONTRÔLE DE LA RÉACTIVITÉ DU CŒUR	6
0.2.3. CONFINEMENT DES PRODUITS RADIOACTIFS	6
0.3. EXIGENCES RELATIVES À LA CONCEPTION	7
0.3.1. RÈGLES FONDAMENTALES DE SÛRETÉ	7
0.3.2. CLASSEMENT DE SÛRETÉ	7
0.3.3. CRITÈRE DE DÉFAILLANCE UNIQUE	7
0.3.4. QUALIFICATION AUX CONDITIONS ACCIDENTELLES	7
0.3.5. CONTRÔLE COMMANDE	8
0.3.6. ALIMENTATIONS ÉLECTRIQUES SECOURUES	8
0.3.7. AGRESSIONS	8
0.4. ESSAIS	8
0.4.1. ESSAIS PRÉALABLES À LA MISE EN SERVICE	8
0.4.2. SURVEILLANCE EN EXPLOITATION	8
0.4.3. ESSAIS PÉRIODIQUES	8
1. BASES DE CONCEPTION	8
1.1. AUTRES FONCTIONS	8
1.2. RÈGLES, CODES ET NORMES	8
1.3. DIMENSIONNEMENT	8
1.3.1. CRAYON DE COMBUSTIBLE	8
1.3.2. ASSEMBLAGE DE COMBUSTIBLE	10
2. DESCRIPTION ET FONCTIONNEMENT	11
2.1. PRÉAMBULE	11
2.2. DESCRIPTION	11
2.2.1. DESCRIPTION GÉNÉRALE DE L'ASSEMBLAGE DE COMBUSTIBLE	11
2.2.2. MATÉRIAUX	14

2.2.3. FABRICATION ET CONTRÔLE	15
2.2.4. MANUTENTION ET STOCKAGE DE L'ASSEMBLAGE DE COMBUSTIBLE	16
2.3. FONCTIONNEMENT	16
2.3.1. FONCTIONNEMENT NORMAL	16
2.3.2. FONCTIONNEMENT EN CONDITIONS DE RÉFÉRENCE PCC-2 À 4	16
3. ANALYSE DE SÛRETÉ	16
3.1. CONFORMITÉ À LA RÉGLEMENTATION	16
3.2. RESPECT DES CRITÈRES FONCTIONNELS	16
3.2.1. EN FONCTIONNEMENT NORMAL	16
3.2.2. EN CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT DE RÉFÉRENCE PCC-3 A 4	23
3.3. CONFORMITÉ AUX EXIGENCES RELATIVES À LA CONCEPTION	24
LISTE DES RÉFÉRENCES.	25

TABLEAUX :

TAB-4.2.1 ASSEMBLAGE DE COMBUSTIBLE — VÉRIFICATION DU DIMENSIONNEMENT DU CRAYON COMBUSTIBLE	26
TAB-4.2.2 ASSEMBLAGE DE COMBUSTIBLE — VERIFICATION DU DIMENSIONNEMENT □	27
TAB-4.2.3 ASSEMBLAGE DE COMBUSTIBLE — FICHE DESCRIPTIVE □	28
TAB-4.2.4 ASSEMBLAGE DE COMBUSTIBLE — MATÉRIAUX UTILISÉS.....	29

FIGURES :

FIG-4.2.1 ASSEMBLAGE COMBUSTIBLE	30
FIG-4.2.2 DESCRIPTION RADIALE D'UN ASSEMBLAGE COMBUSTIBLE	31
FIG-4.2.3 SCHÉMA D'UN CRAYON DE COMBUSTIBLE	32

.4.2 ASSEMBLAGE DE COMBUSTIBLE

Ce sous-chapitre décrit les éléments de conception des assemblages de combustible et dresse la liste des exigences de sûreté relatives à cette conception. Les principales caractéristiques des assemblages combustibles et des grappes de contrôle qui ont servi de données d'entrée pour l'élaboration du Rapport de Sûreté sont regroupées dans le tableau 4.3 TAB 2.

0. EXIGENCES DE SÛRETÉ

0.1. FONCTIONS DE SÛRETÉ

Les fonctions de sûreté qui s'exercent sur les assemblages de combustible constituant le cœur sont les suivantes :

- contrôle de la réactivité, ainsi que la possibilité en toutes circonstances de l'arrêt sûr du cœur,
- évacuation de la puissance résiduelle par le maintien d'une géométrie refroidissable,
- confinement des produits radioactifs, et plus particulièrement des produits de fission, à l'intérieur de la première barrière de confinement.

0.2. CRITÈRES FONCTIONNELS

La conception mécanique de l'assemblage de combustible répond aux critères fonctionnels qui découlent des fonctions de sûreté (voir [§ 0.1.](#)).

Ces critères seront respectés si la compatibilité entre :

- les assemblages de combustible,
- les assemblages et leurs grappes,
- et les assemblages et les équipements internes du réacteur

est assurée.

0.2.1. ÉVACUATION DE LA PUISSANCE RÉSIDUELLE

Le passage d'un débit de fluide réfrigérant suffisant pour évacuer la chaleur produite par le combustible, doit être préservé.

Pour ce faire, le dimensionnement de l'enveloppe du cœur (distance entre plaques inférieure et supérieure, pas des assemblages) et des crayons de combustible (pas nominal, diamètre extérieur, hauteur nominale) doit être conservé.

Ce critère fonctionnel s'applique aux constituants de l'assemblage de combustible listés ci-après.

Assemblage de combustible

La géométrie de l'assemblage de combustible doit être maintenue grâce à :

- l'existence d'un système de maintien à son extrémité supérieure qui vient s'appuyer sous la plaque supérieure du cœur, afin d'éviter le soulèvement de l'assemblage sous l'action des efforts hydrauliques,
- son maintien latéral par deux pions de centrage aux deux extrémités.

Un cloisonnement vient compléter le maintien latéral des assemblages et limiter ainsi les débits de contournement.

Tubes-guides

En participant à la continuité structurelle de l'assemblage, les tubes-guides doivent permettre le refroidissement des composants associés et de l'instrumentation.

Grilles

Les grilles doivent permettre de :

- maintenir axialement et latéralement les crayons de combustible tout au long de la vie de l'assemblage. Le système de supportage des crayons doit s'accommoder d'un grandissement différentiel entre les crayons et le squelette, dû aux dilatations thermiques différentielles et au grandissement sous irradiation,
- maintenir le pas entre les crayons de combustible pour la préservation des performances neutroniques et thermohydrauliques du cœur en conditions de fonctionnement de référence PCC-1 et 2. En conditions de fonctionnement de référence PCC-3 et 4, la géométrie du cœur doit être suffisamment peu déformée pour que le refroidissement du cœur puisse continuer à être assuré,
- favoriser le mélange du réfrigérant en créant une turbulence (prévention du risque d'échauffement critique) et favoriser les échanges thermiques avec les crayons de combustible tout en minimisant les pertes de charge.

Embout inférieur de l'assemblage de combustible

L'embout inférieur doit permettre de :

- positionner latéralement l'assemblage de combustible par rapport à la plaque inférieure du cœur et ainsi de respecter le pas entre assemblages,
- positionner les tubes-guides,
- supporter et transférer les efforts axiaux,
- assurer la distribution de l'écoulement d'entrée dans le cœur du fluide réfrigérant.

Embout supérieur de l'assemblage de combustible

L'embout supérieur doit permettre de :

- positionner latéralement l'assemblage de combustible par rapport à la plaque supérieure du cœur et ainsi de respecter le pas entre assemblages,
- positionner les tubes-guides,
- supporter et transférer les efforts de maintien,
- assurer la distribution de l'écoulement de sortie du cœur du fluide réfrigérant en direction de la plaque supérieure du cœur en minimisant les pertes de charge.

Système de maintien de l'assemblage de combustible

Le système de maintien doit permettre à l'assemblage de :

- 1) résister aux efforts hydrauliques
- 2) admettre des variations relatives de hauteur

Pour le premier cas, au cours du fonctionnement du réacteur, l'assemblage doit être maintenu en contact avec la plaque inférieure du cœur. Afin d'assurer cette fonction, le système de maintien ainsi que la masse de l'assemblage de combustible doivent exercer une force de maintien supérieure à la somme des forces correspondant à la poussée d'Archimède et aux efforts hydrauliques dus au fluide caloporteur.

Pour le deuxième cas, le système de maintien doit absorber les variations apparaissant entre la longueur de l'assemblage de combustible et la distance entre les plaques inférieure et supérieure du cœur. Ces variations sont dues :

- à la dilatation thermique différentielle,
- au grandissement dû à l'irradiation.

Liaisons

Les liaisons crayon/grille et tube-guide/grille doivent permettre d'assurer :

- 1) la continuité structurelle de l'assemblage de combustible
- 2) la stabilité dimensionnelle de l'assemblage de combustible

Le choix et la mise en œuvre des liaisons doivent permettre de respecter les exigences dimensionnelles relatives à l'assemblage, c'est à dire l'alignement des grilles et embouts avec les positionnements axiaux des grilles et les positionnements radiaux des tubes-guides.

0.2.2. CONTRÔLE DE LA RÉACTIVITÉ DU CŒUR

Un temps de chute des grappes de commande compatible avec les études d'accidents doit être respecté. Ce critère fonctionnel s'applique aux constituants suivants de l'assemblage de combustible :

Grappes

Les grappes (mobiles et fixes) sont constituées de crayons qui doivent s'insérer dans tous les tubes-guides des assemblages de combustible (voir sous-chapitre 4.3). En fonctionnement normal, les grappes mobiles permettent de contrôler la puissance du réacteur.

Tubes-guides

Les tubes-guides doivent :

- permettre l'insertion des grappes fixes et des grappes mobiles,
- freiner le mouvement de descente des grappes mobiles lors d'un arrêt automatique du réacteur,
- permettre l'insertion de l'instrumentation.

Grilles

Elles doivent permettre de positionner et supporter latéralement les tubes-guides, même en conditions de fonctionnement de référence PCC-2 à 4, de manière à ce que les grappes de commande puissent toujours être insérées librement à l'intérieur de ceux-ci.

Embouts inférieur et supérieur de l'assemblage de combustible

Les embouts inférieur et supérieur doivent permettre de positionner les tubes guides et prévenir l'éjection des crayons de combustible.

0.2.3. CONFINEMENT DES PRODUITS RADIOACTIFS

La barrière, appelée première barrière de confinement, isolant le fluide réfrigérant primaire du combustible et des produits de fission, doit rester étanche.

Ce critère fonctionnel s'applique aux constituants suivants de l'assemblage de combustible :

Crayon de combustible

La gaine du crayon de combustible doit conserver son intégrité de façon à éviter la contamination du fluide réfrigérant par les produits de fission générés par les pastilles de combustible.

Ce critère fonctionnel doit être respecté lors des conditions de fonctionnement de référence PCC-1 et 2.

Pour les conditions de fonctionnement de référence PCC-3 et 4, l'intégrité du gainage ne peut être garantie, mais le maintien d'une géométrie de refroidissement doit être assuré. Pour ces conditions, un calcul du niveau d'activité est réalisé afin de vérifier que les limites autorisées de rejets sont respectées.

Grilles

Les grilles doivent faciliter les opérations de chargement du cœur ou de manutention des assemblages de combustible de façon à ne pas altérer les gaines des crayons de combustible et remettre ainsi en cause leur intégrité.

Elles doivent également assurer, tout au long de la vie de l'assemblage, un maintien des crayons de combustible suffisant pour éviter une vibration excessive du crayon susceptible de conduire à l'usure et au percement du gainage.

Embout inférieur de l'assemblage de combustible

L'embout inférieur doit faciliter les opérations de chargement du cœur et de manutention des assemblages de combustible de façon à ne pas altérer les gaines des crayons de combustible par des accrochages, et ainsi remettre en cause leur intégrité.

Afin de minimiser les risques d'endommagement de la gaine par des corps étrangers susceptibles d'être présents dans le circuit primaire, l'embout inférieur est muni d'un dispositif anti-débris.

Embout supérieur de l'assemblage de combustible

L'embout supérieur doit permettre lors des opérations de chargement du cœur ou de manutention des assemblages de combustible, la préhension de l'assemblage par un outil de manutention de façon à ne pas altérer les gaines des crayons de combustible par des accrochages et remettre ainsi en cause leur intégrité.

0.3. EXIGENCES RELATIVES À LA CONCEPTION

0.3.1. RÈGLES FONDAMENTALES DE SÛRETÉ

Les fonctions de sûreté remplies par les assemblages de combustible imposent l'application d'un code de conception et de construction (code RCC-C) dont l'application a été approuvée par la RFS V.2.e.

0.3.2. CLASSEMENT DE SÛRETÉ

Les assemblages de combustible ne relèvent pas des classements de sûreté mécanique ou fonctionnel décrits dans le sous-chapitre 3.2 mais ce sont des EIP, liés aux événements radiologiques (EIPS), au sens de l'arrêté INB du 7 février 2012.

0.3.3. CRITÈRE DE DÉFAILLANCE UNIQUE

Sans objet.

0.3.4. QUALIFICATION AUX CONDITIONS ACCIDENTELLES

Sans objet.

0.3.5. CONTRÔLE COMMANDE

Sans objet.

0.3.6. ALIMENTATIONS ÉLECTRIQUES SECOURUES

Sans objet.

0.3.7. AGRESSIONS

Bien qu'aucune classe de sûreté ne soit attribuée à l'assemblage de combustible, sa conception mécanique doit prendre en compte le séisme.

0.4. ESSAIS

Les essais relatifs à la conception du combustible sont traités du [§ 3.2.1.2.](#) au [§ 3.2.1.4.](#)

0.4.1. Essais préalables à la mise en service

Des essais relatifs à la manutention du combustible s'effectuent à l'aide d'assemblages postiches (voir section 9.1.4).

0.4.2. Surveillance en exploitation

La surveillance des défauts d'étanchéité est basée sur des mesures d'activité radiologique, réacteur en fonctionnement, dans le fluide primaire qui doivent permettre de déceler d'éventuels défauts d'étanchéité affectant le combustible et d'en surveiller l'évolution.

0.4.3. Essais périodiques

Sans objet.

1. BASES DE CONCEPTION

1.1. AUTRES FONCTIONS

La production d'énergie est la fonction exercée en fonctionnement normal.

1.2. RÈGLES, CODES ET NORMES

L'assemblage de combustible respecte les contraintes admissibles exigées par le code RCC-M qui reprend celles données par le code ASME.

1.3. DIMENSIONNEMENT

1.3.1. Crayon de combustible

Le respect des règles et des valeurs limites de conception suivantes permet d'assurer l'intégrité du gainage en conditions de fonctionnement de référence PCC-1 et 2.

Gainé

- Stabilité de la gaine
Le crayon de combustible est conçu pour que la gaine ne puisse s'écraser, ni instantanément sur le combustible, dès le début de vie du combustible, ni pendant le séjour en réacteur, même dans l'éventualité de l'absence de pastille sous-jacente.
- Contraintes dans la gaine

La démarche consiste à vérifier que les variations de puissance au niveau des pastilles de combustible n'induisent pas de contraintes prohibitives dans la gaine en conditions de fonctionnement de référence PCC-1 et 2.

La moyenne volumique de la contrainte effective sur la gaine ne doit pas dépasser la limite élastique du matériau de gainage. Ce critère permet d'éviter les contraintes excessives sur la gaine, dues à des variations rapides de la puissance locale, telles que la relaxation de la gaine ne puisse accommoder la dilatation thermique des pastilles

En pratique, la démonstration de la tenue du crayon vis-à-vis des contraintes dans la gaine lors d'une rampe de puissance intègre la prise en compte du risque de rupture de gaine par Interaction Pastille-Gaine / Corrosion Sous Contrainte (IPG/CSC). En effet, l'analyse IPG s'avère dans tous les cas plus contraignante que l'analyse en contrainte moyenne comparée à la limite élastique. L'évaluation du risque IPG est présentée dans la section 19.3.3.1.

- Déformation de la gaine

La déformation circonférentielle uniforme de la gaine au cours d'un événement doit rester limitée (critère dépendant des lois de comportement du matériau), dans les conditions de fonctionnement de référence PCC-1 et 2. Cette exigence, complémentaire de la précédente, permet de tenir compte des transitoires lents de puissance, susceptibles d'entraîner des déformations importantes sans apparition de contraintes prohibitives du fait du fluage de la gaine et de la relaxation des contraintes.

- Pression interne

La pression interne du crayon de combustible le plus sollicité est limitée à une valeur inférieure à celle qui conduirait à une augmentation ou à une réouverture du jeu pastille-gaine par fluage vers l'extérieur de la gaine, en régime de fonctionnement normal établi.

- Fatigue

Les critères de fatigue sont ceux énoncés dans le code RCC-C, annexe D.

La limite d'endurance du matériau de gainage ne doit pas être atteinte dans les conditions normales de cyclage.

Le comportement en fatigue de la gaine est analysé pour prédire sa durée de vie dans les conditions d'exploitation du réacteur conduisant à des sollicitations alternées. Ces dernières imposent en effet des cycles de déformation et donc un cyclage de la gaine.

- Stabilité de la colonne de pastilles

Le ressort situé dans la chambre d'expansion du crayon doit empêcher tout glissement de la colonne combustible dans la gaine lorsque le crayon est soumis à l'accélération axiale enveloppe des conditions de manutention et de transport avant irradiation.

Le but est de préserver l'intégrité de la colonne de pastilles jusqu'au chargement des assemblages en réacteur.

- Usure de la gaine par frottement

Les conditions de maintien du crayon dans les cellules de grilles doivent être telles que :

- a) L'amplitude des vibrations du crayon induites par l'écoulement du fluide primaire reste limitée au droit des grilles, même après relâchement de l'effort initial sous irradiation,
- b) L'usure par frottement de la gaine ne dépasse pas 10 % de son épaisseur nominale.

Le respect de ce critère préserve l'intégrité du crayon.

- Grandissement du crayon de combustible

En fin de vie, l'allongement des crayons sous irradiation doit être compatible avec la distance entre les embouts de l'assemblage.

- Température de gaine

Des limites sur les caractéristiques de la gaine sont nécessaires pour éviter d'être dans des situations qui pourraient conduire à une rupture de gaine, ainsi que dans des conditions où les propriétés mécaniques du gainage sont dégradées.

Pastilles de combustible

Le principal critère de conception concernant le combustible est la température à cœur. Celle-ci ne doit jamais atteindre la température de fusion, qui est fonction de l'irradiation et de la nature du combustible.

Cette limite est imposée afin d'éviter la fusion à cœur du combustible qui, par variation du volume due au changement de phase, conduirait à des sollicitations sévères sur la gaine.

La température de fusion avec incertitude retenue pour les combustibles UO₂ et UO₂-Gd₂O₃ non irradiés est de [] °C.

Le tableau [TAB-4.2.1](#) résume les principaux critères et résultats associés [].

1.3.2. Assemblage de combustible

Les bases de conception mécanique de l'assemblage de combustible se caractérisent par le type des efforts considérés. On distingue en effet :

- les charges non opérationnelles, telles que celles dues aux conditions de transport et de manutention,
- les charges normales et incidentelles définies pour les conditions de fonctionnement de référence PCC-1 et 2,
- les charges accidentelles définies pour les conditions de fonctionnement de référence PCC-3 et 4.

Conditions de transport et de manutention

L'assemblage neuf est conçu pour supporter des accélérations axiale de [] et transversale de [].

Ces valeurs de conception sont enveloppes des accélérations réellement induites lors des opérations courantes de manutention et de transport.

Conditions de fonctionnement de référence PCC-1 et 2

Ce sont principalement les charges sur l'assemblage en fonctionnement normal, en régime transitoire et en cas de survitesse de pompes primaires [].

L'arrêt automatique du réacteur est également inclus, dans ces conditions de fonctionnement. Les charges sur l'assemblage, sont alors superposées aux charges en fonctionnement normal, de façon à obtenir la configuration de fonctionnement la plus défavorable.

Les valeurs admissibles des contraintes sont déterminées selon la procédure définie par le code RCC-M ou à défaut par la Section III du code ASME. Les contraintes statiques, dynamiques et cycliques sont prises en compte.

Pour les matériaux non couverts par le code RCC-M (ou ASME Section III), les contraintes admissibles sont déterminées de façon analogue aux méthodes exposées dans ce code.

De plus, les valeurs de contrainte sont jugées sur les critères définis pour les matériaux de classe 1 dans le code RCC-M volume G pour les situations de fonctionnement normales et perturbées. Pour les matériaux non couverts par le code RCC-M, les contraintes admissibles sont déterminées suivant les méthodes explicitées dans le volume Z de ce code.

L'analyse des sollicitations cycliques comprend aussi un examen de résistance à la fatigue, effectué à partir des courbes de fatigue données par le code RCC-M.

Conditions de fonctionnement de référence PCC- 3 et 4 et conditions de fonctionnement complémentaires

On étudie le cas le plus sévère, c'est-à-dire un chargement hypothétique constitué du cumul des effets d'une rupture de tuyauterie primaire et des effets du séisme de dimensionnement.

Les composants de l'assemblage sont conçus pour supporter des contraintes inférieures aux valeurs admissibles déterminées selon la procédure définie dans le code RCC-M, Annexe ZF (ou à défaut l'Annexe F de la Section III du code ASME).

La stabilité mécanique des tubes-guides et des grilles sous l'effet des chargements dynamiques doit également être vérifiée. La valeur calculée de la force transversale d'impact sur les grilles est comparée à une valeur limite déterminée expérimentalement.

Dans tous les cas, les déformations ou ruptures des composants ne doivent pas entraver :

- l'arrêt automatique du réacteur par la chute des grappes de commande,
- le bon fonctionnement de l'injection de sécurité,
- le refroidissement à long terme du cœur.

Le tableau [TAB-4.2.2](#) résume les principaux critères et résultats associés [\[\]](#).

2. DESCRIPTION ET FONCTIONNEMENT

2.1. PRÉAMBULE

Le présent paragraphe décrit les caractéristiques de l'assemblage de combustible et ses composants, destinées à respecter les exigences de sûreté décrites précédemment. Dans le cas de l'introduction d'assemblages présentant des caractéristiques différentes de celles décrites ci-dessous, le détail de ces caractéristiques fera l'objet d'un document spécifique de type addendum au Dossier Général d'Evaluation de la Sûreté des recharges (DGES).

2.2. DESCRIPTION

2.2.1. Description générale de l'assemblage de combustible

Une fiche synthétique de l'assemblage de combustible est présentée au tableau [TAB-4.2.3](#).

L'assemblage de combustible est constitué de 265 crayons de combustible disposés selon un réseau carré 17 x 17. Les 24 positions restantes sont occupées par les tubes-guides destinés à recevoir soit les grappes définies comme éléments associés et constituées de matériaux non fissiles, soit l'instrumentation du cœur.

Les crayons de combustible sont maintenus en place par une structure porteuse constituée par les 24 tubes-guides, les embouts supérieur et inférieur et les grilles réparties sur la hauteur. Ils sont chargés dans l'assemblage de telle sorte qu'il subsiste un jeu entre leurs extrémités et les embouts.

Tous les assemblages chargés dans le cœur au nombre de 241 sont compatibles entre eux d'un point de vue mécanique et géométrique.

Un schéma illustrant la constitution générale et radiale d'un assemblage de combustible est présenté respectivement en figures [FIG-4.2.1](#) et [FIG-4.2.2](#).

2.2.1.1. Embout inférieur

L'embout inférieur assure la distribution du fluide réfrigérant dans l'assemblage et supporte les charges verticales imposées à la structure. Cet embout, de section carrée, est en acier inoxydable. Il est constitué d'une plaque épaisse nervurée surmontée d'une plaque anti-débris de plus faible épaisseur. La plaque nervurée est supportée par quatre pieds constitués par des montants en forme d'équerre.

L'écoulement du fluide primaire dans l'assemblage s'effectue, en partant de la zone d'accès du fluide, par l'intermédiaire du réseau d'orifices de la plaque nervurée et de la plaque anti-débris.

La plaque anti-débris a pour objectif d'empêcher des corps migrants se trouvant dans le circuit primaire et susceptibles d'endommager les crayons de combustible, de venir se loger dans l'assemblage. Cette plaque limite également les déplacements des crayons vers le bas. Elle est ajourée par de multiples découpes carrées regroupées en motifs au droit des trous de passage du réfrigérant de la plaque nervurée. Ces découpes ont été dimensionnées pour s'assurer d'un filtrage efficace, tout en minimisant la perte de charge de l'embout.

L'assemblage est positionné dans le cœur grâce à deux pions de centrage, venant se placer dans les logements ménagés à cet effet dans deux pieds diagonalement opposés de l'embout inférieur.

2.2.1.2. Embout supérieur

L'embout supérieur a un rôle d'élément de structure de l'assemblage ; il constitue le plénum de sortie du réfrigérant et représente un logement de protection pour les éléments associés de l'assemblage.

L'embout supérieur est constitué par un cadre et une plaque adaptatrice réunis par une jupe mince de section carrée, par quatre ressorts de maintien et par divers éléments mécaniques d'assemblage. Les ressorts et leurs vis de fixation sont en alliage de nickel Ni , tous les autres éléments étant en acier inoxydable.

La plaque adaptatrice, de section carrée, est pourvue d'orifices permettant le passage du réfrigérant. 24 logements circulaires reçoivent les liaisons des tubes-guides. Les liaisons tube-guide / embout supérieur sont réalisées par l'intermédiaire d'une pièce fixée sur l'extrémité supérieure du tube-guide (par soudage ou expansion), et ensuite liée à l'embout supérieur, par un système permettant la démontabilité rapide lors d'opérations de réparation, ainsi qu'un dispositif assurant l'imperdabilité en fonctionnement.

La périphérie de l'embout supérieur ou « jupe » consiste en une enceinte à paroi mince. Elle limite la zone de divergence du réfrigérant et assure la liaison entre la plaque adaptatrice et le cadre.

Le cadre présente en son centre une importante ouverture qui permet le passage des grappes. Cette ouverture dirige la circulation du fluide vers les équipements internes supérieurs à travers la plaque supérieure du cœur.

Deux éléments parallélépipédiques ou « bossages », situés dans deux angles opposés du cadre, possèdent chacun un logement destiné à recevoir les pions de la plaque supérieure de cœur, assurant ainsi le positionnement rigoureux de l'assemblage.

Quatre ressorts multi-lames permettent d'exercer une force suffisante pour s'opposer à la poussée hydraulique du réfrigérant. Ces ressorts sont fixés sur le cadre à l'une de leurs extrémités, avec une force suffisante pour assurer la permanence de la liaison ressort-embout dans toutes les conditions de chargement des ressorts.

La force de maintien est obtenue par flexion des ressorts à lames lors de la mise en place des équipements internes supérieurs.

La conception des ressorts permet également d'éviter le risque de libération accidentelle d'une partie de ressort dans le circuit primaire, dans le cas très improbable de la rupture d'un ressort.

L'embout supérieur assure également une protection partielle des éléments associés à l'assemblage, lors de la manutention du combustible sur le site de fabrication, et pendant son transport sur le site d'utilisation.

Enfin, l'embout supérieur porte l'identification de l'assemblage.

2.2.1.3. Tubes-guides

Les tubes-guides servent de guide aux crayons absorbants des grappes de commande, et de logement aux crayons sources de neutrons, aux crayons des grappes bouchons ainsi qu'à l'instrumentation du cœur.

Ce sont des tubes en alliages base Zirconium, dont le diamètre intérieur est réduit en partie inférieure.

Dans la partie supérieure (ou partie courante), l'espace annulaire entre tube-guide et crayon de grappe est suffisamment large pour permettre une insertion rapide des grappes de commande en cas d'arrêt automatique du réacteur, et une circulation du fluide réfrigérant satisfaisante en fonctionnement normal.

La réduction du diamètre de la partie inférieure du tube-guide appelée « rétreint » lui permet de jouer le rôle d'amortisseur hydraulique lorsque les grappes de commande s'y insèrent en fin de chute. La zone de transition entre les diamètres intérieurs est définie de façon à éviter une variation brusque de la géométrie. Des orifices calibrés sont prévus au-dessus du rétreint pour permettre la circulation du réfrigérant en fonctionnement normal et l'expulsion du fluide lors d'une chute de grappe entraînant l'arrêt du réacteur. L'extrémité inférieure du tube-guide est partiellement obturée par un bouchon soudé et percé d'un trou taraudé permettant la liaison avec l'embout inférieur par le biais d'une vis percée. A l'extrémité supérieure, l'embout supérieur est lié au tube-guide au moyen de deux rangées d'expansion quadrifoliées.

2.2.1.4. Grilles de type 17 x 17

Les crayons de combustible sont supportés par des grilles qui assurent leur maintien et leur espacement correct pendant le séjour de l'assemblage dans le cœur.



Deux types de grilles sont utilisés pour chaque assemblage :

- Le premier type de grille comporte des ailettes de mélange ; il est employé dans la région chaude de l'assemblage de combustible de façon à améliorer le mélange du réfrigérant.
- Le deuxième type de grille, placée à chaque extrémité de l'assemblage, ne possède pas d'ailette de mélange et n'a pour rôle que de positionner et de maintenir les crayons. Deux de ces grilles sont juxtaposées à l'extrémité inférieure de l'assemblage pour renforcer le maintien du crayon en partie basse.

A la périphérie de chaque grille, des ailettes permettent d'éviter les accrochages entre grilles d'assemblages adjacents lors des opérations de chargement et déchargement du cœur.

Les dimensions de la grille tiennent compte du grandissement du matériau sous irradiation et assurent un jeu suffisant entre assemblages en fin de vie.

Au niveau d'une cellule de grille, chaque crayon est maintenu par un double système de ressorts et de bossettes dont l'action s'exerce dans deux plans perpendiculaires. La valeur de la force de contact entre grille et crayon de combustible est suffisamment élevée pour éviter une usure par vibration au contact avec le crayon et pour s'opposer à tout déplacement axial dû aux efforts hydrauliques, tout en limitant les efforts locaux imposés au gainage. Les grilles permettent néanmoins la dilatation thermique axiale des crayons de façon à éviter leur flambage ou leur déformation excessive.

Les cellules de passage des tubes-guides sont équipées de dispositifs permettant leur fixation au tube-guide (par exemples : languettes de soudage, manchon rapporté soudé ou expansé sur le tube-guide).

Les liaisons grille / tube-guide sont dimensionnées pour supporter les efforts de serrage dans le cas de liaisons vissées tubes-guides/embouts et les efforts d'interaction grille-crayon.

2.2.1.5. Crayon de combustible

Le crayon de combustible est constitué d'un tube en alliage de zirconium dans lequel sont empilées, soit des pastilles de dioxyde d'uranium faiblement enrichi (UNE ou URE), soit des pastilles de dioxyde mixte d'uranium et de Gadolinium (Gd). Ce tube est fermé hermétiquement à ses extrémités par des bouchons. La figure [FIG-4.2.3](#) donne une représentation d'un crayon de combustible.

Les pastilles sont des orthocylindres constitués de poudre de dioxyde UO_2 . Les extrémités de chaque pastille aux arêtes chanfreinées comportent des évidements sphériques pour compenser la différence axiale de dilatation entre le centre et la périphérie de la pastille.

Une chambre d'expansion est ménagée à l'extrémité supérieure du crayon pour accommoder le relâchement des gaz de fission produits pendant l'irradiation, ainsi que la dilatation différentielle axiale entre les pastilles et la gaine.

Dans cette chambre d'expansion, un ressort hélicoïdal en acier inoxydable est placé en appui sur la partie supérieure de la colonne de pastilles. Le ressort est conçu pour éviter les déplacements de la colonne fissile dans le crayon qui pourraient se produire lors des opérations de manutention, de transport ou de chargement dans le cœur.

Une chambre d'expansion complémentaire est prévue en partie inférieure du crayon. Une cale en acier inoxydable est introduite entre le bouchon inférieur et la colonne fissile pour positionner cette colonne.

Tous les crayons sont pressurisés à l'hélium afin de réduire les déformations par fluage diamétral de la gaine lors de la mise en pression du circuit primaire et ainsi éviter que la gaine soit solidaire des déformations de la colonne fissile dès le début de l'irradiation. La pressurisation initiale dépend du type de crayon (comportement des matériaux de pastille et de gainage).

2.2.2. Matériaux

Le tableau [TAB-4.2.4](#) donne les différents matériaux utilisés pour la fabrication de l'assemblage de combustible.

2.2.2.1. Gaine de crayon de combustible

Les alliages de zirconium ont été choisis comme matériaux de gainage pour les caractéristiques suivantes :

- faible section efficace d'absorption (conception neutronique),
- propriétés mécaniques satisfaisantes : limite élastique, ductilité, tenue du matériau sous irradiation,
- bonne résistance à la corrosion dans le milieu réfrigérant (dont les caractéristiques sont spécifiées).

Le fluage dans les conditions de température et d'irradiation en réacteur est limité par une conception adaptée du crayon de combustible, en particulier par la pressurisation initiale à l'hélium des crayons.

L'optimisation métallurgique des alliages et le respect d'une spécification sur la teneur en humidité des pastilles ont permis de réduire la prise d'hydrogène et donc le risque de fragilisation.

2.2.2.2. Combustible

La pastille est constituée soit de dioxyde d'uranium (UNE ou URE) UO_2 , soit de dioxyde mixte d'uranium et de Gadolinium (Gd) UO_2 .

Le choix de ces matériaux a été guidé par leurs propriétés suivantes en cas de fissuration de la gaine :

- haute résistance à l'attaque chimique de l'eau,
- capacité à retenir les produits de fission (gazeux ou volatils).

Le choix d'une densité initiale élevée ainsi que l'optimisation de la microstructure des pastilles (spectres de porosité et taille des grains) permettent de limiter la densification en réacteur.

2.2.2.3. Tubes-guides

L'adoption d'alliages base zirconium pour les tubes-guides permet de minimiser :

- les absorptions neutroniques stériles,
- les dilatations thermiques différentielles et les grandissements différentiels sous irradiation entre crayons et squelettes.

Elle se justifie en outre par les bonnes propriétés mécaniques de ces alliages.

2.2.2.4. Ressorts de maintien

L'alliage de nickel [] des ressorts de maintien a été choisi pour ses propriétés mécaniques élevées et pour sa haute résistance à la corrosion en milieu aqueux. Il convient particulièrement aux ressorts de maintien et à leur vis de fixation pour lesquels il est nécessaire d'avoir un matériau peu sensible à l'effet de l'irradiation et aux phénomènes de fluage et de relaxation.

2.2.2.5. Embouts

Les embouts sont en acier inoxydable, choisi pour sa bonne résistance à la corrosion et ses excellentes propriétés mécaniques.

Les ressorts et leurs dispositifs de fixation sont en alliage de nickel []. Les composants de liaison des embouts aux tubes-guides sont en acier inoxydable.

2.2.2.6. Grilles

Pour les grilles d'extrémité, situées dans des zones de flux réduit, on privilégie les matériaux possédant de bonnes propriétés mécaniques et une bonne résistance à la corrosion en milieu aqueux [].

Pour les plaquettes des grilles de mélange sous flux, on utilise des alliages base zirconium permettant de minimiser l'absorption neutronique des grilles et d'optimiser l'utilisation de la matière fissile. []

2.2.3. Fabrication et contrôle

Au cours des différentes étapes de fabrication, des précautions de qualité sont prises au stadedes approvisionnements en matières ainsi qu'au cours des différents procédés mis en œuvre lors dela fabrication des composants élémentaires (fabrication des pastilles, laminage des tubes et plaquettes de grilles, ...). Des contrôles sont de même réalisés au cours des montagesdes sous-ensembles (soudage des bouchons de crayons, des grilles, montage des grilles...) et lors des opérations finales conduisant à la configuration définitive de l'assemblage (étape squelette, étape assemblage).

Des contrôles sont effectués au cours de ces diverses étapes de fabrication pour s'assurer que le produit obtenu a les aptitudes pour un comportement satisfaisant en réacteur (conformité des caractéristiques du produit fabriqué aux exigences déduites des analyses de performances en service) et que le processus de fabrication reste stable (bonne reproductibilité).

L'obtention de la qualité requise sur le produit final est démontrée à la fois :

- par une maîtrise suffisante des divers procédés de fabrication []. Par exemple, les traitements thermiques, les procédés de soudage, pour lesquels des essais préalables à la mise en production déterminent des plages obligatoires de réglage pour les paramètres ayant une influence décisive sur la qualité du produit sortant.
- par les divers contrôles de conformité possibles sur les produits aux diverses étapes clés de leur élaboration (examens visuels, contrôles dimensionnels, contrôles fonctionnels, contrôles non destructifs de santé, contrôles destructifs sur témoins...).

Les modalités de contrôle (contrôle à 100 %, contrôle statistique sur échantillon avec des niveaux de qualité requis, fréquence de prélèvement de témoins de production) sont adaptées à la nocivité des défauts à surveiller.



2.2.4. Manutention et stockage de l'assemblage de combustible

La mise en conteneur et le déchargement se font en position verticale. A l'arrivée sur le site, on vérifie l'état des indicateurs de surcharge équipant le conteneur et les assemblages de combustible subissent un examen visuel. Lors du stockage, les assemblages sont tous orientés de la même façon (un des coins est repéré par une marque) et la cinématique du mouvement qui les amènera dans le cœur du réacteur est identique pour tous les assemblages.

L'extrémité supérieure de l'assemblage de combustible est conçue pour recevoir un outil de manutention spécialement adapté et toute charge de levage ne doit être appliquée qu'à cette extrémité, l'assemblage étant en position verticale. Le levage de l'assemblage à partir de la position horizontale ne peut s'effectuer que par l'intermédiaire d'un berceau spécial supportant la structure sur toute sa longueur.

2.3. FONCTIONNEMENT

2.3.1. Fonctionnement normal

En fonctionnement normal, des limitations sont imposées sur la vitesse de montée en puissance, en particulier après un arrêt de rechargement pour limiter l'interaction pastille gaine (voir sous-chapitre 13.2).

2.3.2. Fonctionnement en conditions de référence PCC-2 à 4

Il est décrit dans le chapitre 15.

3. ANALYSE DE SÛRETÉ

3.1. CONFORMITÉ À LA RÉGLEMENTATION

Sans objet.

3.2. RESPECT DES CRITÈRES FONCTIONNELS

3.2.1. EN FONCTIONNEMENT NORMAL

La conception de l'assemblage de combustible est justifiée par trois démarches : les études analytiques, les essais mécaniques et les essais d'endurance en boucle hydraulique, et l'expérience d'irradiation.

Ce paragraphe s'applique également aux conditions de fonctionnement de référence PCC- 2, l'approche suivie étant identique à celle suivie pour les conditions de fonctionnement de référence PCC-1.

3.2.1.1. ÉTUDES ANALYTIQUES

3.2.1.1.1. ANALYSE DU CRAYON DE COMBUSTIBLE

L'évaluation des performances du crayon combustible en régimes permanent et transitoire conclut au respect de l'ensemble des critères de conception du crayon . Le tableau [TAB-4.2.1](#) résume les principaux résultats.

L'évaluation du risque de rupture de gaine par Interaction Pastille-Gaine / Corrosion Sous Contrainte (IPG/CSC) en régime transitoire fait l'objet de la section 19.3.3.1.

3.2.1.1.1.1. ÉVALUATION DES PERFORMANCES DE LA GAINÉ EN RÉGIME PERMANENT DE FONCTIONNEMENT

Les phénomènes suivants sont pris en compte :

- fluage, déformation élastique et dilatation thermique de la gainé, allongement sous irradiation,
- densification, gonflement et dilatation thermique des pastilles,
- relâchement des gaz de fission,
- pression interne qui est fonction du relâchement des gaz de fission, de la géométrie du crayon et de la distribution de température.

Ces phénomènes sont évalués à partir d'un code de calcul contenant différents modèles et corrélations qui permettent de déterminer les performances du crayon pour une géométrie, un historique de puissance et une distribution axiale de puissance donnés. Ce code prend en compte les caractéristiques thermohydrauliques du fluide primaire et de son interaction avec la gainé.

La pression interne, la distribution de température dans la gainé et la pastille, les contraintes et la déformation de la gainé, la corrosion externe de la gainé, la déformation des pastilles, la densité du combustible, le jeu pastille-gainé et la quantité de gaz de fission relâchés sont déterminés en fonction de l'épuisement du combustible.

Le transfert de chaleur entre pastille et gainé est déterminé en fonction de la composition et de la pression du mélange de gaz, de la température moyenne et de la taille du jeu pastille-gainé ou de la pression de contact entre la pastille et la gainé.

Les études en régime permanent de fonctionnement permettent de vérifier les bonnes performances de la gainé.

3.2.1.1.1.2. ÉVALUATION DES PERFORMANCES DE LA GAINÉ EN RÉGIME TRANSITOIRE

Les crayons de combustible subissent de nombreux transitoires de puissance durant leur séjour en réacteur. Ces transitoires sont dus d'une part aux manœuvres volontaires réalisées en fonctionnement normal (suivi de réseau, fonctionnement prolongé à puissance réduite), d'autre part aux séquences incidentelles susceptibles de se produire et dont le nombre demeure restreint.

Le comportement du crayon pendant les transitoires de puissance est étudié pour vérifier que les critères de conception ne sont pas dépassés.

Le jeu initial pastille-gainé diminue en cours d'irradiation jusqu'à atteindre le contact pastille-gainé sous l'effet, d'une part, de la dilatation thermique et du gonflement de la pastille, d'autre part du fluage de la gainé vers l'intérieur dû à la différence entre la pression interne du crayon et celle du fluide réfrigérant. Un état d'équilibre thermomécanique s'établit alors entre la pastille et la gainé en fonctionnement stable.

La dilatation plus importante de l'oxyde d'uranium par rapport à celle du matériau de gainage entraîne une poussée de la pastille sur la gainé lors des accroissements de température induits par toute augmentation de puissance. Ces élévations de température contribuent au relâchement d'une fraction des produits de fission retenus dans la pastille. Les valeurs de contraintes, des déformations et de la pression interne qui résultent de ces phénomènes sont comparées aux valeurs limites de conception.

Les études en régime transitoire permettent de vérifier que les contraintes et déformations restent inférieures aux valeurs limites qui ont été définies pour éviter les risques de rupture de la gainé.

La synthèse des démonstrations de sûreté concernant ce phénomène est présentée dans le chapitre 19.

3.2.1.1.1.3. FLEXION DES CRAYONS

L'étude de la flexion des crayons sous charge axiale (notamment l'arcure des crayons sous irradiation) est décrite dans le [§ 3.2.1.4.](#)

3.2.1.1.2. ANALYSE DE L'ASSEMBLAGE DE COMBUSTIBLE

L'évaluation des performances de l'assemblage de combustible conclut à l'intégrité mécanique de l'ensemble des composants de l'assemblage [1]. Le tableau [TAB-4.2.2](#) résume les principaux résultats.

3.2.1.1.2.1. ÉTUDE STATIQUE

C'est l'étude des charges mécaniques, hydrauliques, thermiques et des charges dues à l'irradiation en régime permanent.

L'assemblage de combustible est représenté par un modèle analytique [1].

On étudie séparément les différents cas correspondant aux gradients de température et d'épuisement. Les intensités de contraintes calculées restent bien, dans tous les cas, inférieures aux limites imposées.

De plus, il est vérifié que le dimensionnement du système de maintien de l'assemblage est suffisant pour se prémunir contre l'envol de l'assemblage [1]. Cette évaluation est réalisée dans les conditions hydrauliques de conception définies par les analyses thermohydrauliques conduites sur le réacteur EPR de Flamanville 3 et notamment à partir des coefficients de perte de charge des composants de l'assemblage [1].

3.2.1.1.2.2. VIBRATIONS

La vitesse élevée de l'écoulement du fluide réfrigérant dans le cœur introduit une énergie susceptible de créer ou d'entretenir les vibrations de composants. Au niveau de l'assemblage, on distingue trois formes de vibrations : les vibrations forcées (étude de résonance), les vibrations dues aux écoulements transversaux existant dans le cœur, et les vibrations dues à l'écoulement longitudinal dans le faisceau des tubes.

- Vibrations forcées

Les vibrations forcées sont de deux ordres : les mouvements vibratoires des structures des équipements internes, dans les gammes de fréquences plus élevées que celles de l'assemblage, et les mouvements vibratoires créés par les excitations propres à l'écoulement, fluctuations de l'effort hydraulique liées aux fréquences de pompes primaires et toujours de faible énergie à l'entrée du cœur.

L'étude effectuée est une analyse modale de l'assemblage pour caractériser les fréquences et modes propres. Un très important amortissement dans l'assemblage et l'examen de fréquences montrent l'absence de problèmes de résonance.

- Vibrations sous écoulement

Dans les vibrations sous écoulement, sont distingués divers mécanismes d'excitation (turbulence, tourbillons de VON KARMAN, vibrations de type fluide - élastique).

A partir de données d'écoulement transverses enveloppes [1] définies par les analyses thermohydrauliques de l'assemblage [1] et des corrélations expérimentales, on vérifie que le crayon ne présente pas d'instabilité vibratoire sous ces excitations et on évalue son amplitude de vibration.

3.2.1.1.2.3. AUTRES COMPOSANTS DE L'ASSEMBLAGE

Tubes-guides

Le calcul des contraintes dans les tubes-guides est effectué pour tous les cas de chargement de l'assemblage et les valeurs calculées sont comparées aux valeurs admissibles.

Grilles

L'espacement des canaux d'écoulement et la force exercée par les ressorts sont étudiés statistiquement sur les grilles en cours de fabrication. A partir de ces valeurs, on calcule des forces de glissement du crayon dans la cellule dans des conditions nominales de température et d'irradiation.

D'autre part, les supportages de grilles sont modélisés au moyen d'éléments structuraux (type de ressorts, éléments de glissement) permettant de simuler les interfaces crayons-grilles. Cette

modélisation permet d'intégrer les caractéristiques des grilles au niveau des modèles d'études de comportement mécanique de l'assemblage.

Embout inférieur

L'étude de l'embout inférieur soumis à des charges axiales transmises par les tubes-guides est réalisée soit analytiquement, à l'aide d'un modèle aux éléments finis, soit à partir d'essais.

Les contraintes maximales ainsi déterminées respectent les limites définies précédemment.

Embout supérieur

La justification de l'intégrité mécanique de l'embout supérieur concerne principalement la plaque adaptatrice. L'étude analytique est réalisée au moyen d'un modèle aux éléments finis.

Les conclusions de l'analyse sont similaires à celles du paragraphe précédent.

Ressort de maintien

Les flèches du ressort sont calculées en fonction du comportement de l'assemblage en réacteur compte tenu de la déformation permanente du ressort induite lors du montage des équipements internes supérieurs dans le cœur.

Ces études permettent de montrer que le ressort conserve une force de maintien suffisante pendant la durée de vie de l'assemblage.

3.2.1.2. ESSAIS DE VALIDATION DE LA CONCEPTION MÉCANIQUE

Ces essais ont pour objectifs principaux :

- de fournir les différents paramètres nécessaires aux études analytiques (données et recalage des modèles d'étude),
- d'obtenir une connaissance précise du comportement de l'assemblage et de ses constituants, et de leurs limites de fonctionnement.

Les principaux essais réalisés, leurs buts et les principales conclusions sont résumés ci-après.

3.2.1.2.1. ESSAIS SUR LES RESSORTS DE MAINTIEN

Il s'agit d'essais de compression permettant :

- de déterminer la courbe caractéristique force-flèche des ressorts de maintien,
- de vérifier l'intégrité mécanique de la vis et des lames de ressort sous l'effet de charges enveloppes et de cyclages mécaniques.

Leur objectif est de montrer que la fonction maintien du ressort est préservée dans tous les cas de chargement correspondant au fonctionnement normal (condition de fonctionnement de référence PCC-1).



3.2.1.2.2. ESSAIS SUR LA LIAISON CRAYON-GRILLE

Il s'agit des essais suivants :

- détermination des caractéristiques des ressorts de grille,
- détermination de la force de glissement du crayon dans la cellule de grille.

Leur objectif est de montrer que les modèles mathématiques utilisés pour étudier la structure permettent la détermination de ses caractéristiques utilisées lors des analyses suivantes :

- étude du comportement latéral de l'assemblage de combustible,
- étude du régime vibratoire du crayon et des phénomènes d'usure,
- étude des sollicitations axiales sur l'assemblage de combustible, dues à l'expansion différentielle crayon/tubes-guides.

3.2.1.2.3. ESSAIS SUR LA LIAISON TUBE-GUIDE/GRILLE

Il s'agit de déterminer la résistance mécanique de la liaison sous un effort axial et, le cas échéant (grille d'extrémité), sous une sollicitation de torsion.

L'objectif est de vérifier l'intégrité mécanique de la liaison soumise aux sollicitations de conception.

3.2.1.2.4. ESSAIS SUR GRILLES

Il s'agit de déterminer les caractéristiques latérales statiques (raideur, charge de flambage statique) et dynamiques (raideur, amortissement sous impact, charge de flambage dynamique).

L'objectif est de prouver, en particulier, qu'il n'y a pas de risque de flambage des grilles, susceptible de gêner la chute des grappes de commande dans l'hypothèse pénalisante du cumul des chargements dus au séisme et de l'accident de perte de réfrigérant primaire le plus pénalisant.

3.2.1.2.5. ESSAIS SUR EMBOUTS SUPÉRIEUR ET INFÉRIEUR

Il s'agit d'essais de mise en charge axiale de chaque embout (détermination des raideurs axiales et de la distribution des contraintes ou des déformations dans les plaques adaptatrices).

L'objectif est de permettre de vérifier la résistance des embouts sous les charges maximales de conception.

3.2.1.2.6. ESSAIS SUR L'ASSEMBLAGE DE COMBUSTIBLE

Essais statiques

Il s'agit d'essais de mises en charge latérale et axiale de l'assemblage (détermination des raideurs, répartition de contraintes dans les tubes-guides, stabilité).

L'objectif est de montrer que les caractéristiques statiques de l'assemblage, jointes à celles précédemment obtenues sur les composants, permettent d'élaborer les deux modèles de calcul statique axial et latéral, utilisés pour les analyses de fonctionnement normal (condition de fonctionnement de référence PCC-1). La comparaison des résultats d'essais aux résultats d'analyse permet de justifier les modèles utilisés lors de l'analyse du comportement de l'assemblage.

Essais dynamiques

Il s'agit d'essais de vibrations libres de l'assemblage et d'essais d'impacts latéral et axial (détermination de la fréquence propre, de l'amortissement et de la répartition des contraintes lors d'un impact).

L'objectif de ces essais est de fournir les données nécessaires aux études de tenue au séisme et lors d'accident par rupture du circuit primaire. Ils permettent d'estimer la représentativité des modèles analytiques, de vérifier le comportement vibratoire de l'assemblage en régime normal et de s'assurer que la résistance de celui-ci permet de supporter les charges maximales d'impact.

3.2.1.3. ESSAIS DE VÉRIFICATION DE LA CONCEPTION HYDRAULIQUE

Ces essais, réalisés en boucle hydraulique, permettent de reproduire les conditions de température, pression et écoulement auxquelles est soumis l'assemblage de combustible en fonctionnement normal.

Les principaux essais sont résumés ci-après.

3.2.1.3.1. DÉTERMINATION DES SOLlicitATIONS HYDRAULIQUES SUR L'ASSEMBLAGE DE COMBUSTIBLE

Il s'agit de mesurer les pertes de charge et d'en déduire les efforts axiaux sur l'assemblage, en fonction du débit.

L'objectif est de permettre de vérifier les données hydrauliques. Ils permettent également de déterminer les efforts hydrauliques sur les différents constituants de l'assemblage et de justifier la conception des ressorts de maintien.

3.2.1.3.2. ESSAIS DE CHUTE DE GRAPPES DE COMMANDE

Il s'agit de mesurer le temps de chute jusqu'à l'entrée de l'amortisseur ainsi que le temps nécessaire pour parcourir celui-ci.

L'objectif est de justifier la conception des tubes-guides. Ils permettent de vérifier le temps de chute des grappes et le respect des critères de conception.

3.2.1.3.3. ESSAIS D'ENDURANCE SUR ASSEMBLAGE ET GRAPPE DE COMMANDE

Il s'agit des essais suivants :

- simulation des mouvements de la grappe dans l'assemblage,
- étude de l'influence des caractéristiques des cellules de grilles sur le risque d'usure des crayons par vibration sous écoulement.

L'objectif est de justifier la conception de l'assemblage, en particulier de vérifier que les caractéristiques des éléments de supportages sont de nature à prévenir une usure significative des crayons par petits débattements. □

3.2.1.4. EXPÉRIENCE D'IRRADIATION DU COMBUSTIBLE

Diverses vérifications expérimentales, décrites dans ce paragraphe, spécifiques de ce type de combustible ou extrapolées à partir d'essais réalisés pour des combustibles de conception voisine ont pour but de contrôler les conceptions mécanique et thermohydraulique.

3.2.1.4.1. EXPÉRIENCE D'EXPLOITATION DANS LES RÉACTEURS DE PUISSANCE

L'ensemble des résultats d'exploitation indique un comportement satisfaisant des crayons de combustible. Notamment, le taux de crayons défectueux est très faible et les niveaux d'activité en produits de fission observés dans le réfrigérant primaire sont bien inférieurs aux limites prises en compte dans la conception du circuit de contrôle volumétrique et chimique du fluide primaire.

Les améliorations de la conception ont permis de remédier efficacement aux quelques défauts qui avaient pu apparaître lors des premières exploitations en réacteur de crayons de combustible à gaine en alliage base zirconium.

Il s'agissait principalement :

- de l'hydruration interne des gaines,
- de la densification des pastilles et flambage circonférentiel des gaines dans les zones où celles-ci ne sont plus soutenues,
- de l'arcure des crayons entre grilles,
- de l'usure des crayons par fretting.

Pour le premier cas, ce phénomène était dû à une teneur excessive en humidité des pastilles d'oxyde. Depuis que la définition d'une spécification sévère sur l'humidité des pastilles est utilisée, ce défaut n'est plus apparu.

Dans le deuxième cas, le combustible des toutes premières générations était caractérisé par de faibles densités de l'oxyde et de faibles pressurisations des crayons. Quelques cas de densification

avaient été constatés en réacteur. Une telle densification était due à la disparition de pores de petite taille en début de vie jusqu'au moment où le gonflement compense le phénomène. Les effets éventuels pouvaient être une réduction de la longueur de la colonne de pastilles (augmentation de la puissance linéique moyenne), voire même une formation de vides dans l'empilement, avec comme conséquence la présence de pics locaux de puissance apparaissant dans les crayons voisins ainsi qu'un risque pour la gaine de subir d'abord un affaissement lent par fluage et ensuite, par instabilité, l'écrasement par flambage.

Les solutions qui ont permis de minimiser les effets de densification et les risques d'affaissement de la gaine ont été, principalement, l'augmentation de la densité et l'optimisation de la microstructure des pastilles ainsi que la pressurisation interne initiale des crayons.

Ces solutions techniques se sont montrées efficaces en exploitation en réacteur.

Pour le troisième cas, l'arcure des crayons a été observée sur un certain nombre d'assemblages et un important effort a été mené pour comprendre la cause et les effets de ce phénomène. Cette arcure peut être attribuée à divers paramètres tels que : élongation différentielle crayon/tubes-guides, existence d'une valeur seuil de glissement au niveau des grilles, hétérogénéité azimutale de la température et du flux sur une même gaine, variation circonferentielle d'épaisseur de la gaine.

L'étude des conséquences de cette arcure montre qu'il n'y a pas de risque de voir la structure se déformer.

Par conception, un jeu suffisant crayons-plaques d'embouts est réservé pour éviter tout flambage axial du combustible dû à une interférence crayons-embouts par grandissement différentiel des gaines et du squelette sous irradiation.

Pour le quatrième cas, le fretting étant survenu en partie inférieure de l'assemblage, les fournisseurs ont ajouté une grille supplémentaire en bas de l'assemblage combustible. Cette grille permet d'améliorer le maintien de la partie inférieure du crayon, et de limiter son amplitude de débattement quel que soit l'épuisement.

Concernant la structure de l'assemblage, le phénomène de déformation des assemblages combustibles peut engendrer une variation de la taille de la lame d'eau – espace en cœur entre deux grilles situées à une même hauteur pour deux assemblage de combustible adjacents – par rapport à sa valeur nominale.

Plusieurs évolutions de produit combustible ont déjà été introduites sur le Parc pour limiter les déformations d'assemblages ; le combustible retenu pour l'EPR intègre ces évolutions.

3.2.1.4.2. PROGRAMME D'ESSAIS ET DE SUIVI D'IRRADIATION

Outre les essais hors réacteur destinés, en premier lieu, à déterminer les caractéristiques mécaniques des gaines, d'importants programmes d'essais et de suivi d'irradiation permettent de démontrer la fiabilité des crayons de combustible à gaine en alliage de zirconium et d'explorer leurs limites de fonctionnement.

Les principaux buts de ces programmes d'irradiation sont de :

- démontrer les performances du combustible pour différentes combinaisons du niveau de puissance et de l'épuisement,
- déterminer les propriétés des matériaux et leur comportement en réacteur.

Les examens portent principalement sur les domaines suivants :

- comportement du crayon en régime permanent (fluage de la gaine, gonflement et densification du combustible, relâchement des gaz de fission, contraintes et déformations de la gaine),
- réactions chimiques gaine-réfrigérant et gaine-combustible,

- comportement du crayon en régime transitoire et en suivi de charge (interaction pastille-gaine, fatigue de la gaine).

Des programmes de surveillance sont mis en place pour chaque nouveau produit. Les principaux objectifs de ce programme de surveillance sont de :

- vérifier les prédictions du comportement du combustible dans des conditions représentatives de fonctionnement,
- améliorer les connaissances de base en vue d'apporter d'éventuelles améliorations à la méthodologie de conception du combustible et d'augmenter la fiabilité du produit.

3.2.2. EN CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT DE RÉFÉRENCE PCC-3 A 4

3.2.2.1. ÉTUDE STATIQUE

Les valeurs des intensités de contraintes résultant de l'analyse conservative des conditions de fonctionnement de référence PCC-3 et 4 restent toujours inférieures aux intensités de contrainte maximale admissible.

3.2.2.2. ÉTUDE DYNAMIQUE

L'étude des charges dynamiques imposées à l'assemblage comprend essentiellement l'étude de l'arrêt automatique du réacteur (chute des grappes de commande) et les études d'accidents (rupture de tuyauterie primaire, séisme). Les charges obtenues sont superposées aux charges permanentes afin de s'assurer du bon comportement de l'assemblage.

Arrêt automatique du réacteur

Il se traduit par une suppression dans la partie inférieure des tubes-guides au moment où l'extrémité des crayons pénètre dans l'amortisseur et par une force d'impact de l'araignée de la grappe sur la plaque adaptatrice en fin de course des grappes de commande.

Un modèle analytique représentant l'assemblage permet de déterminer les distributions de contraintes dans les composants de la structure (tube-guide, embout supérieur...).

L'analyse de fatigue est faite en supposant un nombre maximal de chutes de grappes pendant la durée d'irradiation en réacteur de l'assemblage. L'étude, réalisée avec une grande marge de sécurité, montre que les contraintes restent faibles et n'ont pas de conséquences sur l'intégrité de l'assemblage, quel que soit le nombre de cycles envisagé.

Séisme de dimensionnement

On étudie les réactions de l'assemblage aux excitations axiales et transversales.

Dans la direction verticale, les mouvements sismiques sont susceptibles d'induire des variations d'efforts verticaux par rapport au poids propre de l'assemblage. Ces variations d'efforts sont combinées \square avec celles de l'APRP (voir alinéa suivant). Le résultat obtenu permet de vérifier les critères de contrainte et de stabilité des composants de l'assemblage.

Si les forces horizontales sont suffisamment élevées, l'assemblage se déforme et vient buter contre l'assemblage voisin ou l'enveloppe du cœur.

Deux aspects sont à considérer :

- étude des forces exercées sur les grilles lors de l'impact,
- étude des contraintes dans les tubes-guides d'assemblages.

L'analyse réalisée est une analyse dynamique. Une étude préalable sur la cuve et les équipements internes du réacteur fournit les données nécessaires (mouvement des plaques du cœur). □

On réalise ensuite une étude sur □ assemblages □. L'analyse montre que les forces d'écrasement sur les grilles restent inférieures à la charge critique de flambage. Cette analyse fournit les données nécessaires à l'étude de la distribution des contraintes dans l'assemblage. Les déformées conduisant aux contraintes maximales dans les tubes guide sont retenues dans l'analyse.

On vérifie que les contraintes obtenues restent inférieures aux contraintes admissibles maximales données par le code RCC-M, qui reprend les exigences du code ASME.

Accident par rupture de tuyauterie primaire

En cas de rupture d'une branche primaire chaude, une dépression brutale parcourt le volume correspondant aux équipements internes supérieurs alors que la partie basse du cœur reste à la pression de fonctionnement. Les assemblages de combustible sont entraînés vers le haut, décollent de la plaque inférieure, puis, sont projetés vers le bas et viennent buter sur la plaque inférieure du cœur. L'étude fait apparaître quelques rebonds de l'assemblage mais l'amortissement du mouvement est très rapide.

En cas de rupture de branche primaire froide, le volume de la partie basse du cœur subit une dépression brutale avant les équipements internes supérieurs. Une force d'écrasement est appliquée sur le cœur qui, par réaction du support, est entraîné vers le haut avant de revenir buter sur la plaque inférieure du cœur selon un schéma semblable au cas précédent.

L'accident de perte de réfrigérant primaire (APRP) se traduit également par des efforts dissymétriques sur l'enveloppe de cœur ; il entraîne, par des oscillations horizontales des structures supportant l'assemblage de combustible, des effets analogues à ceux du séisme (déformation latérale des assemblages et impacts au niveau des grilles).

Les déformations d'assemblage et les efforts d'impacts sur embout ou grille sont évalués au moyen des divers modèles d'analyse mécanique d'accident □

□

Accident de dimensionnement

Le dimensionnement de l'assemblage de combustible est vérifié en combinant □ les effets du séisme de dimensionnement et l'accident de perte de réfrigérant primaire le plus pénalisant.

Cette analyse montre que la structure de l'assemblage conserve son intégrité mécanique :

- les contraintes dans les embouts et les tubes-guides restent en dessous des limites spécifiées,
- la compression maximale de l'assemblage ne conduit pas à instabilité des tubes-guides,
- les forces d'impact au niveau des grilles sont inférieures à la charge critique de flambage.

3.3. CONFORMITÉ AUX EXIGENCES RELATIVES À LA CONCEPTION

Le RCC-C et le RCC-M sont appliqués pour la conception mécanique de l'assemblage.



RAPPORT DE SURETE

— DE FLAMANVILLE 3 —

Version Publique

Edition DEMANDE DE MISE EN SERVICE

CHAPITRE 4

SECTION 2

PAGE 25/32

CENTRALES NUCLÉAIRES

Palier EPR

LISTE DES RÉFÉRENCES



RAPPORT DE SURETE

— DE FLAMANVILLE 3 —

Version Publique

Edition DEMANDE DE MISE EN SERVICE

CHAPITRE 4

SECTION 2

PAGE 26/32

CENTRALES NUCLÉAIRES

Palier EPR

TAB-4.2.1 ASSEMBLAGE DE COMBUSTIBLE —
VÉRIFICATION DU DIMENSIONNEMENT DU CRAYON
COMBUSTIBLE

□



RAPPORT DE SURETE
— DE FLAMANVILLE 3 —

CHAPITRE 4

CENTRALES NUCLÉAIRES

Version Publique

SECTION 2

Palier EPR

Edition DEMANDE DE MISE EN SERVICE

PAGE 27/32

TAB-4.2.2 ASSEMBLAGE DE COMBUSTIBLE —
VERIFICATION DU DIMENSIONNEMENT □

□



RAPPORT DE SURETE

— DE FLAMANVILLE 3 —

Version Publique

Edition DEMANDE DE MISE EN SERVICE

CHAPITRE 4

SECTION 2

PAGE 28/32

CENTRALES NUCLÉAIRES

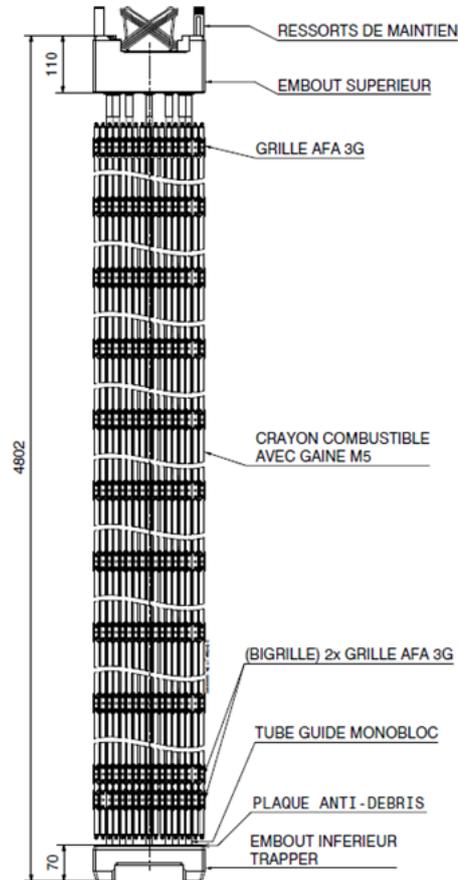
Palier EPR

**TAB-4.2.3 ASSEMBLAGE DE COMBUSTIBLE — FICHE
DESCRIPTIVE** □

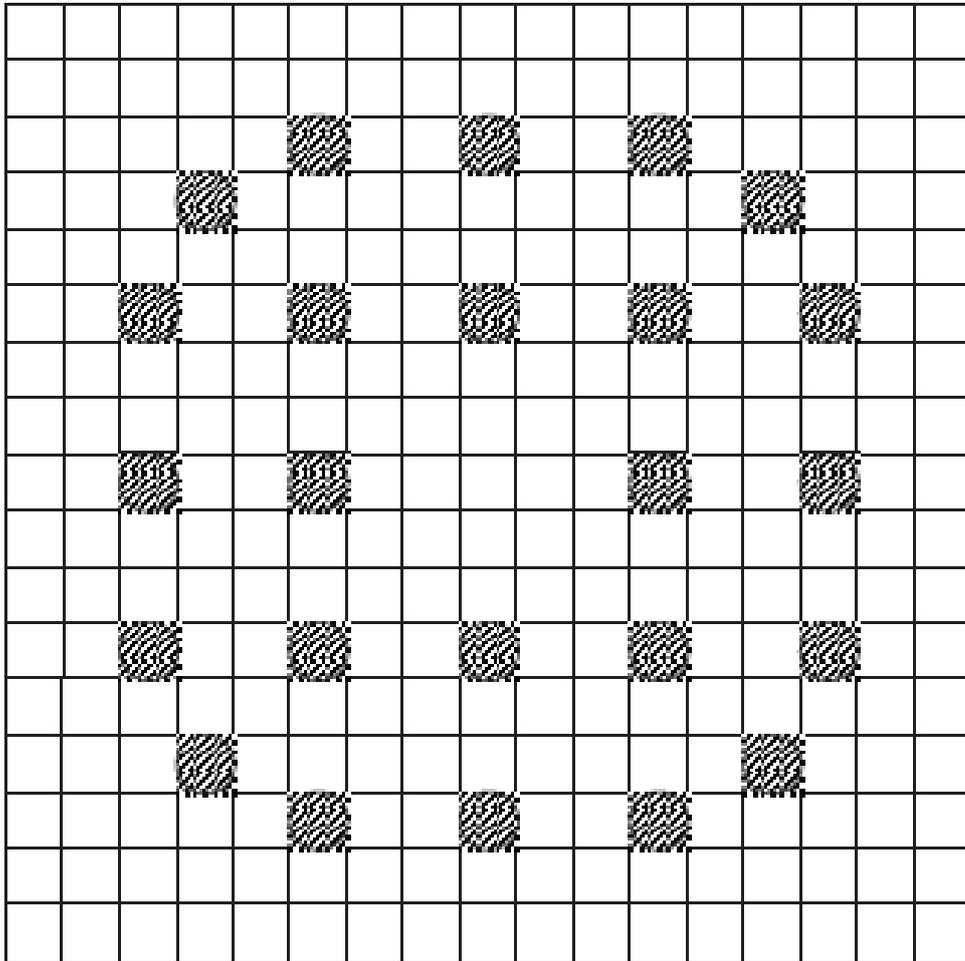
□

TAB-4.2.4 ASSEMBLAGE DE COMBUSTIBLE —
MATÉRIAUX UTILISÉS

ÉLÉMENTS CONSTITUANTS	MATÉRIAUX
Pastilles de combustible	Dioxyde d'uranium (UNE ou URE) ou Dioxyde mixte d'uranium et de gadolinium (Gd)
Gainage de crayon de combustible	Alliage de Zirconium
Ressort de crayon de combustible	Acier inoxydable
Ensemble tube-guide	Alliage de Zirconium
Vis de fixation du tube-guide sur l'embout inférieur	Acier inoxydable
Liaison entre le tube-guide et l'embout supérieur	Composants en acier inoxydable et alliages base Nickel
Cale inférieure du crayon combustible	Acier inoxydable
Ressorts de maintien	Alliage de nickel []
Vis de fixation des ressorts	Alliage de nickel []
Embout inférieur	Acier inoxydable
Embout supérieur	Acier inoxydable
Plaquettes de grilles	Alliage de Zirconium
Ressorts de grille	Alliage de nickel []

FIG-4.2.1 ASSEMBLAGE COMBUSTIBLE

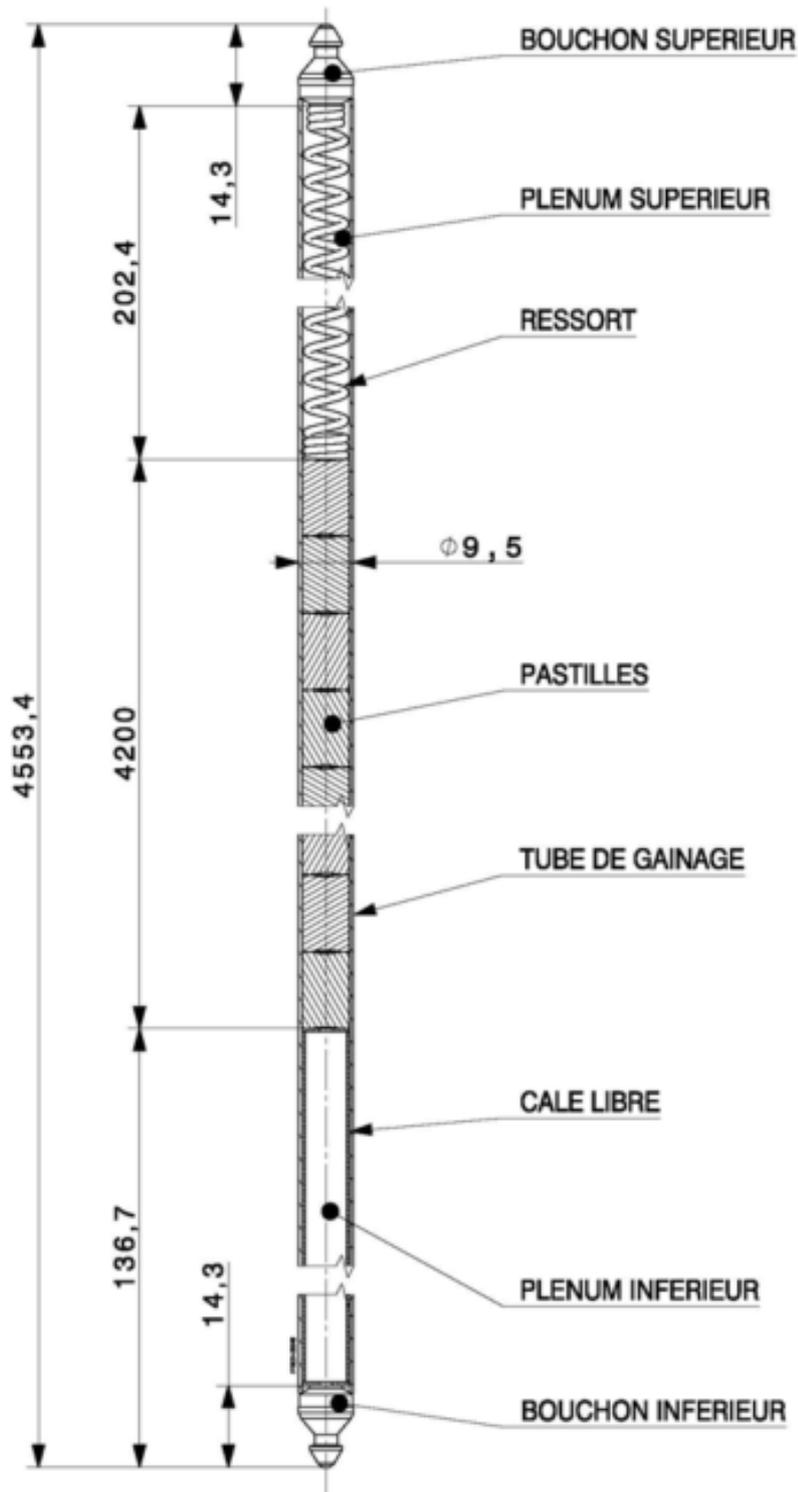
**FIG-4.2.2 DESCRIPTION RADIALE D'UN ASSEMBLAGE
COMBUSTIBLE**



 CRAYON COMBUSTIBLE

 TUBE-GUIDE

FIG-4.2.3 SCHÉMA D'UN CRAYON DE COMBUSTIBLE



SOMMAIRE

.4.3	CONCEPTION NEUTRONIQUE	7
0.	EXIGENCES DE SÛRETÉ	7
0.1.	FONCTIONS DE SÛRETÉ	7
0.2.	CRITÈRES FONCTIONNELS	7
0.2.1.	CONTRÔLE DE LA RÉACTIVITÉ DU CŒUR	7
0.2.2.	ÉVACUATION DE LA CHALEUR PRODUITE DANS LE COMBUSTIBLE	7
0.2.3.	CONFINEMENT DES PRODUITS RADIOACTIFS	7
0.3.	EXIGENCES DE CONCEPTION	8
0.4.	ESSAIS ET VÉRIFICATIONS	8
0.4.1.	CONTRÔLE DES COMPOSANTS ET DU COMBUSTIBLE	8
0.4.2.	ESSAIS PRÉLIMINAIRES	8
0.4.3.	ESSAIS PÉRIODIQUES	8
0.4.4.	SURVEILLANCE EN SERVICE	8
1.	BASES DE CONCEPTION	8
1.1.	ÉPUISEMENT DU COMBUSTIBLE	9
1.2.	COEFFICIENTS DE RÉACTIVITÉ	9
1.3.	CONTRÔLE DE LA DISTRIBUTION DE PUISSANCE	10
1.4.	TAUX MAXIMUM D'INSERTION DE RÉACTIVITÉ	10
1.5.	MARGES D'ARRÊT	11
1.6.	SOUS CRITICITÉ	11
1.7.	STABILITÉ	11
2.	DESCRIPTION D'ENSEMBLE DU CŒUR	12
3.	DISTRIBUTIONS DE PUISSANCE	14
3.1.	DÉFINITIONS	14
3.2.	DISTRIBUTION RADIALE DE PUISSANCE	16
3.3.	DISTRIBUTION AXIALE OU DISTRIBUTION DE PUISSANCE 3D	18
3.4.	DISTRIBUTIONS DE PUISSANCE LIMITATIVES	18
3.5.	VÉRIFICATION EXPÉRIMENTALE	19
3.5.1.	ANALYSE DES DISTRIBUTIONS DE PUISSANCE	19
3.5.2.	CONFORMITÉ DU CŒUR	19

3.5.3. SURVEILLANCE EN LIGNE ET SYSTÈMES DE PROTECTION	19
4. COEFFICIENTS DE RÉACTIVITÉ	19
4.1. COEFFICIENT DE TEMPÉRATURE DU COMBUSTIBLE (DOPPLER)	20
4.2. COEFFICIENTS MODÉRATEUR	20
4.3. COEFFICIENT DE PUISSANCE	21
4.4. COEFFICIENTS DE RÉACTIVITÉ UTILISÉS DANS L'ANALYSE DES ÉVÉNEMENTS	21
5. CONTRÔLE DU CŒUR	22
5.1. EXIGENCES ET PRINCIPES DE CONTRÔLE	22
5.1.1. ÉPUISEMENT	22
5.1.2. EMPOISONNEMENT XÉNON ET EMPOISONNEMENT SAMARIUM	22
5.1.3. DÉMARRAGE AU PIC XÉNON	22
5.1.4. SUIVI DE CHARGE ET CONTRÔLE DU XÉNON	22
5.1.5. SOUS-CRITICITÉ ET MARGE D'ARRÊT	22
5.2. MOYENS DE CONTRÔLE	23
5.2.1. POISON CHIMIQUE	23
5.2.2. POISONS CONSOMMABLES	23
5.2.3. GRAPPES D'ARRÊT ET DE CONTRÔLE	23
5.3. MODE T DE PILOTAGE	24
5.3.1. CONTRÔLE DU CŒUR	24
5.3.2. HYPOTHÈSES ASSOCIÉES AU MODE T DANS LA DÉMONSTRATION DE SÛRETÉ	24
6. EFFICACITÉ DES GRAPPES	25
7. SOUS-CRITICITÉ DES ENTREPOSAGES D'ASSEMBLAGES COMBUSTIBLES DANS LE BÂTIMENT COMBUSTIBLE	26
8. COURBES DE CHALEUR RÉSIDUELLE	26
8.1. TERME A	27
8.2. TERME B + C	27
9. IRRADIATION DE LA CUVE ET ÉCHAUFFEMENT GAMMA DU RÉFLECTEUR LOURD	27
10. MÉTHODES ET OUTILS	28

10.1. GÉNÉRATION DES BIBLIOTHÈQUES DE DONNÉES	
MACROSCOPIQUES	28
10.2. CALCULS DE CŒUR	28
10.3. CALCULS DE CHALEUR RÉSIDUELLE	28
10.4. CALCULS DE FLUENCE CUVE ET D'ÉCHAUFFEMENT GAMMA	
DANS LE RÉFLECTEUR LOURD	28
10.5. CALCULS DE SOUS-CRITICITÉ DES ENTREPOSAGES	
D'ASSEMBLAGES COMBUSTIBLES DANS LE BÂTIMENT	
COMBUSTIBLE	28
10.6. INCERTITUDES	28
LISTE DES RÉFÉRENCES.	29

TABLEAUX :

TAB-4.3.1	PARAMÈTRES DE CONCEPTION NUCLÉAIRE	30
TAB-4.3.2	DESCRIPTION DU CŒUR DU RÉACTEUR.....	31
TAB-4.3.3	PARAMÈTRES DE CONCEPTION NUCLÉAIRE (COEFFICIENTS DE RÉACTIVITÉ)	36
TAB-4.3.4	CYCLE □ – RÉSUMÉ DES RÉSULTATS NEUTRONIQUES	37
TAB-4.3.5	CYCLE □ – RÉSUMÉ DES RÉSULTATS NEUTRONIQUES	38
TAB-4.3.6	RÉSULTATS SYNTHÉTIQUES POUR TOUS LES CYCLES DE LA PREMIÈRE GESTION.....	39
TAB-4.3.7	MARGE D'ARRÊT DANS LES CONDITIONS DE PUISSANCE NULLE □ A CHAUD	40
TAB-4.3.8	MARGE D'ARRÊT DANS LES CONDITIONS DE REFROIDISSEMENT PARTIEL □.....	41
TAB-4.3.9	SOUS-CRITICITÉ DES ENTREPOSAGES D'ASSEMBLAGES COMBUSTIBLES DANS LE BÂTIMENT COMBUSTIBLE (ENTREPOSAGE SOUS EAU)	42
TAB-4.3.10	NIVEAUX TYPIQUES DE FLUX DE NEUTRONS (N/CM²-S) A PLEINE PUISSANCE.....	43
TAB-4.3.11	VALEURS TYPIQUES D'ÉCHAUFFEMENT GAMMA DANS LE RÉFLECTEUR LOURD	44
TAB-4.3.12	VALEURS NOMINALES □ DE FACTEURS D'INCERTITUDES TECHNOLOGIQUES POUR LES CYCLES □ DE LA GESTION EPR FA3	45

FIGURES :

FIG-4.3.1	LOCALISATION DES CRAYONS ABSORBANTS POUR LES GRAPPES NOIRES.....	46
FIG-4.3.2	LOCALISATION DES CRAYONS ABSORBANTS POUR LES GRAPPES GRISES	47
FIG-4.3.3	LOCALISATION DES CRAYONS GADOLINIUM PAR ASSEMBLAGE	48
FIG-4.3.4	ENCHAÎNEMENT DES CYCLES DE LA PREMIÈRE GESTION	49
FIG-4.3.5	SCHÉMA DE CHARGEMENT DU CYCLE □	50
FIG-4.3.6	SCHÉMA DE RECHARGEMENT DU CYCLE □.....	51

FIG-4.3.7 DISTRIBUTION RADIALE DE PUISSANCE ET DE BURN-UP :	
CYCLE [] – BURN-UP DE 150 MW J/T.....	52
FIG-4.3.8 DISTRIBUTION RADIALE DE PUISSANCE ET DE BURN-UP :	
CYCLE [] – FIN DE VIE NATURELLE.....	53
FIG-4.3.9 DISTRIBUTION RADIALE DE PUISSANCE ET DE BURN-UP :	
CYCLE [] – FIN DE STRETCH	54
FIG-4.3.10 DISTRIBUTION RADIALE DE PUISSANCE ET DE BURN-UP :	
CYCLE [] – BURN-UP DE 150 MWJ/T.....	55
FIG-4.3.11 DISTRIBUTION RADIALE DE PUISSANCE ET DE BURN-UP :	
CYCLE [] – FIN DE VIE NATURELLE.....	56
FIG-4.3.12 DISTRIBUTION RADIALE DE PUISSANCE ET DE BURN-UP :	
CYCLE [] – FIN DE STRETCH	57
FIG-4.3.13 DISTRIBUTION DE PUISSANCE PAR CRAYON DANS UN	
ASSEMBLAGE TYPIQUE, À UN BURN-UP DE 150 MW J/T, PLEINE	
PUISSANCE À CHAUD, XÉNON À L'ÉQUILIBRE DU CYCLE [].....	58
FIG-4.3.14 DISTRIBUTION DE PUISSANCE PAR CRAYON DANS UN	
ASSEMBLAGE TYPIQUE, EN FIN DE VIE NATURELLE, PLEINE	
PUISSANCE À CHAUD, XÉNON À L'ÉQUILIBRE DU CYCLE [].....	59
FIG-4.3.15 DISTRIBUTION DE PUISSANCE PAR CRAYON DANS UN	
ASSEMBLAGE TYPIQUE, A UN BURN-UP DE 150 MWJ/T, PLEINE	
PUISSANCE À CHAUD, XÉNON À L'ÉQUILIBRE DU CYCLE	
D'ÉQUILIBRE []	60
FIG-4.3.16 DISTRIBUTION DE PUISSANCE PAR CRAYON DANS UN	
ASSEMBLAGE TYPIQUE EN FIN DE VIE NATURELLE, PLEINE	
PUISSANCE A CHAUD, XÉNON À L'ÉQUILIBRE DU CYCLE	
D'ÉQUILIBRE []	61
FIG-4.3.17 DISTRIBUTION AXIALE DE PUISSANCE MOYENNE CŒUR,	
XÉNON A L'ÉQUILIBRE, A UN BURN-UP DE 150 MW J/T DU CYCLE	
[]	62
FIG-4.3.18 DISTRIBUTION AXIALE DE PUISSANCE MOYENNE CŒUR,	
XÉNON A L'ÉQUILIBRE, EN FIN DE VIE NATURELLE DU CYCLE	
[]	63

FIG–4.3.19 DISTRIBUTION AXIALE DE PUISSANCE MOYENNE CŒUR, XÉNON A L'ÉQUILIBRE, A UN BURN-UP DE 150 MW J/T DU CYCLE D'ÉQUILIBRE □	64
FIG–4.3.20 DISTRIBUTION AXIALE DE PUISSANCE MOYENNE CŒUR, XÉNON A L'ÉQUILIBRE, EN FIN DE VIE NATURELLE DU CYCLE D'ÉQUILIBRE □	65
FIG–4.3.21 COEFFICIENT DOPPLER EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE EFFECTIVE POUR LE CYCLE □	66
FIG–4.3.22 COEFFICIENT DOPPLER EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE EFFECTIVE POUR LE CYCLE D'ÉQUILIBRE □	67
FIG–4.3.23 SCHÉMA DE GRAPPE – SÉQUENCE N°1	68
FIG–4.3.24 SCHÉMA DE GRAPPE – SÉQUENCE N°2	69
FIG–4.3.25 CONFIGURATIONS D'ASSEMBLAGES PÉNALISANTS POUR LES CALCULS DE SOUS-CRITICITÉDES ENTREPOSAGES D'ASSEMBLAGES COMBUSTIBLES DANS LE BÂTIMENT COMBUSTIBLE	70
FIG–4.3.26 PUISSANCE RÉSIDUELLE, DÉSINTÉGRATION DES PRODUITS DE FISSION ET DES ACTINIDES	71

.4.3 CONCEPTION NEUTRONIQUE

0. EXIGENCES DE SÛRETÉ

0.1. FONCTIONS DE SÛRETÉ

Les fonctions de sûreté assurées par la conception neutronique du cœur sont :

- le contrôle de la réactivité du cœur pour permettre l'arrêt de la réaction en chaîne en toutes circonstances et l'arrêt du réacteur dans un état sûr,
- l'évacuation de la chaleur produite dans le combustible, par l'intermédiaire du fluide de refroidissement,
- le confinement des substances radioactives (actinides et produits de fission) à l'intérieur de la première barrière de confinement.

La conception neutronique doit garantir le respect de ces fonctions de sûreté pour toutes les conditions de fonctionnement de référence (PCC-1 à PCC-4) et contribuer à leur respect dans les conditions correspondant aux catégories de réduction du risque RRC-A ainsi qu'en situation d'accident grave.

0.2. CRITÈRES FONCTIONNELS

0.2.1. Contrôle de la réactivité du cœur

La réactivité du cœur doit être contrôlée dans toutes les conditions de fonctionnement normales, du démarrage du réacteur jusqu'à son arrêt, par deux moyens diversifiés.

L'un consiste à utiliser les grappes, l'autre à faire varier la concentration en bore soluble dans le fluide de refroidissement. Ces deux moyens sont fonctionnellement complémentaires pour assurer la maîtrise de la réactivité.

Lorsque le cœur est critique à n'importe quel niveau de puissance, les contre-réactions neutroniques sont telles que le réacteur est intrinsèquement stable en cas d'excursion de puissance.

0.2.2. Évacuation de la chaleur produite dans le combustible

A n'importe quel endroit du cœur, la chaleur produite devra être limitée pour que :

- Son évacuation puisse être garantie dans des conditions de fonctionnement de référence PCC-1 et PCC-2 en maintenant un transfert thermique efficace entre le crayon de combustible et le réfrigérant.
- Elle ne provoque pas de dégradation de la structure géométrique du cœur dans des conditions de fonctionnement de référence PCC-1 à PCC-4.
- Elle reste dans des limites compatibles avec la conception mécanique de l'assemblage combustible.

0.2.3. Confinement des produits radioactifs

Pour garantir le confinement, les conditions thermo-mécaniques imposées à la gaine du combustible doivent être telles que son intégrité soit assurée, en conditions de fonctionnement de référence PCC-1 et PCC-2.

0.3. EXIGENCES DE CONCEPTION

La conception neutronique n'est pas soumise à des exigences de conception spécifiques. Cependant, les fonctions de sûreté qu'elle assure nécessitent l'application d'un programme d'assurance qualité dont l'objectif est de documenter et de contrôler les activités associées.

0.4. ESSAIS ET VÉRIFICATIONS

0.4.1. Contrôle des composants et du combustible

Des contrôles seront réalisés sur le combustible après fabrication. En particulier, des mesures de fabrication seront effectuées pour vérifier que les facteurs d'incertitude technologique du canal chaud des analyses de conception sont respectés.

0.4.2. Essais préliminaires

La conformité du cœur par rapport aux études de conception sera vérifiée par des essais physiques en début de cycle.

0.4.3. Essais périodiques

La conformité du cœur par rapport aux études de conception sera vérifiée pendant la totalité du cycle en surveillant la concentration en bore et les distributions de puissance afin de calibrer les chaînes d'instrumentation (surveillance et protection).

0.4.4. Surveillance en service

Sans objet.

1. BASES DE CONCEPTION

Ce chapitre décrit les bases de conception ainsi que les exigences fonctionnelles utilisées pour la conception neutronique du cœur.

Les variations de réactivité sont présentées en pcm : réactivité en pcm = $10^5 \Delta\rho$, où le paramètre $\Delta\rho$ est calculé à partir de deux valeurs de K_{eff} selon :

$$\Delta\rho = \frac{1}{K1} - \frac{1}{K2}$$

Où :

- $K1$ = K_{eff} de l'état initial,
- $K2$ = K_{eff} de l'état final.
- K_{eff} représente le facteur de multiplication effectif de neutrons et est défini par :

$$K_{eff} = \frac{\text{productions}}{\text{absorptions} + \text{fuites}}$$

- ρ est la réactivité (exprimée en pcm) qui représente l'écart par rapport à 1 du facteur de multiplication effectif, soit :

$$\rho = \frac{K_{eff} - 1}{K_{eff}}$$

Comme cela est précisé dans le [§ 0.1.](#), les fonctions de sûreté doivent être remplies dans toutes les conditions de fonctionnement du réacteur. Les conditions de fonctionnement de référence (PCC) sont classées en quatre catégories, selon la fréquence estimée de leur apparition (voir sous-chapitre 15.0).

Les objectifs de sûreté sont définis notamment en termes de limites radiologiques. Ces objectifs de sûreté sont ensuite déclinés en critères de sûreté pour chaque condition de référence (voir sous-chapitre 15.0). Aux critères de sûreté associés à la tenue des barrières de confinement sont associés des phénomènes physiques limitatifs susceptibles de leur porter atteinte. Ces critères qualitatifs sont ensuite déclinés quantitativement en critères techniques d'acceptation.

Ces critères incluent à la fois :

- des critères quantitatifs découlant directement du respect des exigences de sûreté (limites physiques),
- des critères quantitatifs introduits pour des raisons pratiques, afin de réaliser séparément les calculs thermohydrauliques et neutroniques d'une part et les calculs radiologiques d'autre part (valeurs découplées permettant de s'assurer de manière simplifiée du respect des objectifs radiologiques).

Les limites sur la distribution de puissance imposées par les critères de sûreté en PCC-1 sont respectées grâce à un dimensionnement conservatif, et préservées grâce à des actions du système de contrôle. Les exigences relatives aux PCC-2 à PCC-4 sont satisfaites grâce à un système de protection adéquat qui surveille différents paramètres du réacteur.

1.1. ÉPUISEMENT DU COMBUSTIBLE

Le dimensionnement neutronique consiste à définir un combustible suffisamment réactif pour obtenir le taux d'épuisement visé pour la région déchargée, taux qui doit être inférieur au taux d'épuisement de 62 GWj/t autorisé pour la gestion GALICE (voir [Réf \[2\]](#)).

Le taux d'épuisement est une mesure de l'épuisement du combustible qui représente la production d'énergie intégrée du combustible rapportée à sa masse et constitue un moyen pratique pour définir des critères d'irradiation pour le combustible.

La durée de cycle ou le taux d'épuisement de décharge prévisionnels sont obtenus en prévoyant au départ un excédent de réactivité suffisant dans chaque zone de combustible et en définissant à chaque cycle un plan de chargement du combustible (semblable à celui décrit au [§ 2.](#)) qui remplit tous les critères liés à la sûreté. Pour la première gestion du réacteur EPR FA3 décrite au [§ 2.](#), le taux d'épuisement crayon maximal de décharge vaut 62 GWj/t et le taux d'épuisement assemblage maximal de décharge vaut 57,2 GWj/t (voir tableau [TAB-4.3.1](#)).

L'excédent de réactivité initial du combustible, bien que n'étant pas une base de conception, doit être suffisamment élevé pour maintenir le cœur critique à pleine puissance tout au long du cycle, avec le xénon et le samarium d'équilibre et avec la présence de tous les autres produits de fission. La Fin De Vie naturelle du cycle est définie comme se produisant lorsque la concentration de poison chimique est proche de zéro, avec des grappes de contrôle insérées suffisamment pour répondre aux besoins opérationnels. En termes de concentration en bore soluble, cela représente approximativement 10 ppm de bore naturel, toutes grappes extraites.

Il n'est pas nécessaire de limiter l'excédent de réactivité initial autrement que vis-à-vis d'autres bases de conception comme les coefficients de réactivité du cœur et la marge d'arrêt, dont il est question ci-dessous.

1.2. COEFFICIENTS DE RÉACTIVITÉ

Le coefficient de température du combustible doit être négatif et le coefficient de température du modérateur doit rester en principe négatif, depuis les conditions de puissance nulle à chaud jusqu'aux conditions de fonctionnement nominal, toutes grappes de contrôle extraites du cœur. Le coefficient de vide du fluide de refroidissement doit être négatif dans tous les cas. Cependant, certains types de

gestion du combustible pourraient entraîner de fortes concentrations de bore en début de vie du cœur et donner par conséquent un coefficient de température du modérateur positif.

Si on considère le cas de la compensation d'une augmentation rapide de réactivité, deux principaux effets interviennent. Il s'agit de l'effet de l'absorption résonnante (effet Doppler) associée aux changements de température du combustible, et de l'effet de réactivité (variations du spectre et de l'absorption du bore) résultant des changements de densité du modérateur. Ces caractéristiques physiques élémentaires sont souvent identifiées par des coefficients de réactivité. L'utilisation d'uranium légèrement enrichi garantit le fait que le coefficient Doppler soit négatif. Ce coefficient donne la contre-réaction de réactivité la plus rapide. Le cœur est également conçu pour avoir en principe un coefficient de réactivité de température du modérateur négatif, depuis les conditions de puissance nulle à chaud jusqu'aux conditions de fonctionnement nominal, de manière à ce que la température moyenne du réfrigérant ou le taux de vide produise un autre effet de contre-réaction de réactivité, plus lent.

Il est possible d'obtenir un coefficient de température du modérateur négatif en utilisant un poison consommable fixe et/ou des grappes de contrôle pour limiter la concentration de bore naturel soluble. Le contenu de ce poison consommable (en termes de quantité et de répartition) n'est pas défini comme élément de dimensionnement au-delà du fait qu'il est lié à l'obtention d'un coefficient de température du modérateur non positif.

Les gestions évoquées dans ce document ont été établies sur la base d'un coefficient de température du modérateur négatif, à une puissance nulle à chaud et toutes les grappes de contrôle extraites du cœur.

1.3. CONTRÔLE DE LA DISTRIBUTION DE PUISSANCE

Les bases de la conception neutronique sont les suivantes, avec un niveau de confiance d'au moins 95% :

- 1) La densité moyenne de puissance linéique à froid du combustible au point chaud ne doit pas être supérieure à la limite indiquée au tableau [TAB-4.3.1](#) dans des conditions de fonctionnement normales.
- 2) Pour des événements PCC-1 et PCC-2, y compris en cas de surpuissance maximale, le pic de puissance du combustible ne doit pas provoquer la fusion à cœur du combustible.
- 3) Pour des événements PCC-1 et PCC-2, y compris en cas de surpuissance maximale, la distribution de puissance devra permettre de respecter le critère de bas RFTC (bas Rapport de Flux Thermique Critique pour la crise d'ébullition) (voir sous-chapitre 4.4).
- 4) La gestion du combustible sera définie de manière à satisfaire les hypothèses avancées dans l'analyse de l'intégrité mécanique des crayons de combustible vis-à-vis des puissances et des épuisements des crayons combustibles.

Le calcul des perturbations maximales des distributions de puissance qui peuvent affecter les limites définies pour la conception du combustible est effectué grâce à des méthodes éprouvées. Les conditions dans lesquelles les distributions de puissance limitatives sont supposées apparaître sont choisies de manière conservative par rapport aux états de fonctionnement admissibles.

Bien qu'il y ait un bon accord entre les calculs de pic de puissance et les mesures, une incertitude nucléaire (voir [§ 3.5.1.](#)) est appliquée au calcul du pic de puissance local. Cette incertitude sert à la fois à l'analyse des états de fonctionnement normaux et des événements considérés à la conception.

1.4. TAUX MAXIMUM D'INSERTION DE RÉACTIVITÉ

Le taux maximum d'insertion de réactivité dû au retrait des grappes de commande en puissance ou à la dilution du bore est limité. Pour un fonctionnement normal en puissance, le taux maximum d'insertion de réactivité en cas de retrait accidentel des groupes de grappes de commande est défini (voir tableau [TAB-4.3.1](#)) de telle manière que le pic de puissance thermique et le RFTC (Rapport de Flux Thermique Critique) ne dépassent pas les limites fixées en cas de surpuissance.

Le taux maximum d'insertion de réactivité dû au retrait accidentel d'une ou plusieurs grappes de contrôle est limité par la vitesse maximale de la grappe (ou par sa course) et par l'efficacité de la (ou des) grappe(s). La vitesse maximale d'une grappe de contrôle (voir tableau [TAB-4.3.1](#)) est telle que le taux maximum de variation de la réactivité, lors d'un retrait accidentel des grappes, est inférieur à sa limite. Pendant le fonctionnement normal en puissance, le taux maximum d'insertion de réactivité est inférieur à la valeur du taux maximum de conception.

Le taux maximum d'insertion de réactivité dû à la dilution du bore est, quant à lui, limité par la capacité du RCV. Ce taux est couvert par celui induit par le retrait accidentel des grappes de contrôle.

Les taux de variation de la réactivité sont calculés de manière conservative, en supposant que l'on ait des distributions axiales de puissance et de xénon défavorables.

Le taux d'insertion de réactivité correspondant à la décroissance du xénon au pic est bien inférieur au taux maximum d'augmentation de la réactivité dans le cadre d'un fonctionnement normal (voir tableau [TAB-4.3.1](#)).

1.5. MARGES D'ARRÊT

Une marge d'arrêt suffisante et une certaine sous-criticité sont requises, respectivement dans les conditions de fonctionnement en puissance et dans les conditions d'arrêt.

Deux systèmes indépendants de contrôle de la réactivité sont mis en place, à savoir les grappes et le bore soluble dans le fluide de refroidissement.

Le système de grappes peut compenser les effets en réactivité dus à des changements de température du combustible et du modérateur qui accompagnent les changements de niveau de puissance lors du passage réacteur en puissance à puissance nulle. De plus, le système de grappes procure une marge d'arrêt minimum en cas d'accident, et il est capable d'assurer la sous-criticité du cœur suffisamment rapidement pour éviter le dépassement des limites acceptables d'endommagement du combustible, en supposant que la grappe la plus efficace reste coincée hors du cœur lors de l'arrêt automatique du réacteur.

Les systèmes de borication peuvent compenser toutes les variations de concentration du xénon et variations de densité entraînant des changements de réactivité, et ils doivent permettre au réacteur d'aller vers l'arrêt à froid, et de l'y maintenir.

Ainsi, une marge d'arrêt suffisante est obtenue par ces deux moyens de contrôle, l'un étant un système mécanique et l'autre un système de poison chimique.

1.6. SOUS CRITICITÉ

Lorsque les assemblages combustibles sont dans la cuve du réacteur et que le couvercle de la cuve est ouvert ou va être retiré, le cœur doit pouvoir conserver une sous-criticité suffisante pour garantir la sûreté du réacteur en cas d'apparition d'un événement dans ces conditions. Les événements envisagés concernent le retrait intempestif de toutes les grappes de contrôle et les situations de non-conformité du cœur (voir section 15.2.3h).

La concentration en bore requise pour satisfaire les critères d'arrêt pour rechargement du combustible est spécifiée dans le sous-chapitre 4.5.

1.7. STABILITÉ

La centrale doit être intrinsèquement stable vis-à-vis des oscillations de puissance en mode fondamental¹. Les oscillations spatiales de puissance à l'intérieur du cœur à niveau de puissance constant, s'il devait s'en produire, doivent être détectées et réduites voire annulées de manière sûre.

1. Toute perturbation de flux peut être exprimée en une somme d'harmoniques. La première de celles-ci correspond au mode fondamental de la perturbation.

Les oscillations de puissance totale du cœur (c'est-à-dire les variations fortuites de niveau de puissance), quelle qu'en soit la cause, sont détectées par les dispositifs de limitation et de protection. Le cœur est protégé par ces dispositifs avec des actions progressives (réduction de puissance) et, le cas échéant, un arrêt automatique du réacteur se produirait si la puissance augmentait de manière inacceptable, afin de préserver les marges initialement prévues par rapport aux limites fixées pour le combustible. La stabilité de l'ensemble turbine/générateur de vapeur/cœur et du système de contrôle du réacteur est telle que les oscillations de puissance totale du cœur ne sont normalement pas possibles. La redondance des circuits de protection garantit que la probabilité de dépassement des niveaux de puissance prévus lors de la conception de la centrale est extrêmement faible.

Les oscillations radiales et azimutales dues aux effets spatiaux du xénon s'amortissent d'elles-mêmes sans qu'aucune intervention de la part d'un opérateur ni aucune action de contrôle ne soient nécessaires pour les supprimer. La stabilité par rapport aux oscillations radiales est telle que cette excitation est fortement improbable. Des oscillations azimutales amorties peuvent être excitées, entre autres, par le déplacement individuel d'une grappe de contrôle, ce qui n'est pas une action autorisée. Ces oscillations sont facilement observables et on est averti rapidement de leur présence par l'instrumentation incore et excore ce qui, selon l'amplitude des oscillations, peut entraîner une alarme et une action de l'opérateur. Toutefois, les oscillations dans le plan horizontal s'amortissent d'elles-mêmes grâce aux effets de contre-réaction de réactivité inhérents à la conception du cœur. Le respect des exigences de stabilité du cœur associées à la conception neutronique est justifié dans la [Réf \[3\]](#).

Des oscillations axiales de puissance dues au xénon peuvent se produire pendant la vie du cœur. Les grappes de contrôle sont là pour contrôler la distribution de puissance axiale. En cas de mise en défaut de ce contrôle, une alarme est déclenchée et une action de blocage de l'augmentation de puissance est mise en place. De plus, la garantie que les limites prévues au départ pour le combustible ne sont pas dépassées est apportée par le dispositif de protection.

2. DESCRIPTION D'ENSEMBLE DU CŒUR

Différents types de gestion du combustible ont été définis pour dimensionner le réacteur. Des gestions de type OUT/IN et IN/OUT, caractérisées par une puissance de \square et de \square , ainsi que par du combustible UO₂ et du combustible MOX, ont été définies dans les premières phases de conception du réacteur : elles ont notamment été utilisées pour le dimensionnement des gros composants et du système de refroidissement de la piscine de stockage. Une gestion de type OUT/IN, caractérisée par une puissance de \square et par du combustible UO₂, a été définie plus récemment pour vérifier le bon dimensionnement du réflecteur lourd et de la cuve.

La première gestion du combustible à être implantée dans le réacteur et qui fait l'objet du présent rapport de sûreté est une gestion de type IN/OUT, caractérisée par une puissance de \square et par du combustible UO₂. Elle est décrite dans la note de gestion prévisionnelle en [Réf \[4\]](#). Les caractéristiques principales de cette première gestion sont détaillées ci-dessous.

Le cœur du réacteur est constitué d'un certain nombre de crayons combustibles regroupés en faisceaux par des grilles de maintien et des embouts supérieurs et inférieurs. Les crayons combustibles contiennent des pastilles d'oxyde d'uranium empilées dans un tube de gainage en \square obturé et soudé de manière étanche pour encapsuler le combustible. Les faisceaux, appelés assemblages combustibles, sont disposés selon un schéma qui se rapproche d'un ortho-cylindre. Chaque assemblage combustible peut être formé d'un réseau 17 x 17, composé de 265 crayons de combustible et de 24 tubes guides. Le cas échéant, certains crayons combustibles peuvent être remplacés par des cales composées d'un matériau inerte. Les caractéristiques du réacteur EPR FA3 du point de vue de l'instrumentation interne n'imposent pas d'avoir un trou d'eau au centre de l'assemblage.

\square

L'enchaînement des cycles de la première gestion est présenté à la figure [FIG-4.3.4](#).

Des assemblages d'enrichissements différents en uranium sont utilisés dans le chargement initial du premier cœur pour créer une distribution radiale de puissance favorable. La figure [FIG-4.3.5](#) décrit le schéma de chargement du combustible uranium employé dans le premier cœur. Dans la partie

centrale du cœur, deux zones constituées avec les assemblages des deux enrichissements les plus faibles s'interpénètrent de manière à former un motif en damier. La troisième zone est organisée autour, en périphérie du cœur, et contient les assemblages d'enrichissement le plus élevé. Les enrichissements du premier cœur sont décrits au tableau [TAB-4.3.2](#).

Le schéma de repositionnement, la position initiale et la position finale des assemblages combustible, le nombre d'assemblages de combustible neuf et la façon dont ils sont placés dépendent des besoins en énergie pour le cycle suivant ainsi que des historiques d'épuisement et de puissance des cycles précédents. Les schémas de rechargement des cycles  sont présentés dans la figure [FIG-4.3.5](#) et [FIG-4.3.6](#).

L'enrichissement moyen du cœur est déterminé par la quantité de matériaux fissiles nécessaires à l'obtention de la longueur de cycle et de la quantité d'énergie désirées. Les phénomènes physiques accompagnant le processus d'épuisement du combustible sont tels que le fonctionnement du réacteur conduit à appauvrir la quantité de combustible disponible en raison de l'absorption des neutrons par les atomes fissiles et de leur fission, qui en découle. La vitesse d'épuisement en atomes fissiles est directement proportionnelle au niveau de puissance auquel le réacteur fonctionne.

De plus, le processus de fission conduit à la formation de produits de fission, dont certains absorbent facilement les neutrons. Ces effets, appauvrissement et accumulation des produits de fission, sont en partie compensés par l'accumulation de plutonium qui survient en raison de l'absorption sans fission des neutrons dans l'U-238. Par conséquent, au début de chaque cycle, une réserve de réactivité doit être « constituée » dans le réacteur, pour compenser l'appauvrissement du combustible fissile et la formation de produits de fission sur la durée du cycle. Cet excédent de réactivité est contrôlé par l'utilisation d'un matériau absorbeur de neutrons sous la forme de bore dissous dans le fluide primaire, et sous la forme de poisons consommables.

Les poisons consommables, mélangés au matériau du combustible lui-même, sont utilisés pour éviter une augmentation trop importante de la concentration du bore soluble et par voie de conséquence du coefficient modérateur en début de vie. Durant le fonctionnement, le poison que contiennent ces crayons s'épuise, apportant ainsi une contribution positive à la réactivité, qui compense en partie la baisse de réactivité provenant de l'appauvrissement du combustible et de l'accumulation des produits de fission. La vitesse d'épuisement du poison consommable n'est pas un paramètre critique, dans la mesure où le poison chimique est toujours disponible et suffisamment souple pour couvrir tout écart éventuel sur la vitesse d'épuisement du poison consommable par rapport à celle qui était attendue.

En plus du contrôle de la réactivité, le poison consommable permet d'obtenir une distribution radiale de puissance favorable, par optimisation de sa répartition. L'oxyde de gadolinium (Gd₂O₃) est choisi comme poison consommable et des assemblages avec  crayons gadolinium sont utilisés. Leur localisation est donnée dans la figure [FIG-4.3.3](#).

Dans les assemblages sans gadolinium, tous les crayons combustibles ont le même enrichissement en uranium, radialement et axialement. Dans les assemblages uranium avec gadolinium, les crayons gadolinisés n'ont pas le même enrichissement en U235 que les crayons sans gadolinium.

Des sources de neutrons sont utilisées au démarrage des premiers cycles, afin de disposer d'un taux de comptage significatif à l'approche de la divergence. Il existe deux types de sources, les sources primaires et les sources secondaires.

Les crayons source primaire, utilisés lors du premier démarrage de la centrale, sont constitués d'une source en , émetteur spontané de neutrons. Les crayons source secondaire sont constitués . Sous l'effet de l'irradiation pendant un cycle,  qui est émetteur gamma. La réaction des gammas sur  génère le flux de neutrons nécessaire au démarrage des cycles suivants.

Les tableaux [TAB-4.3.1](#) à [TAB-4.3.3](#) contiennent un récapitulatif des paramètres de conception neutronique du cœur du réacteur avec notamment les coefficients de réactivité, les fractions de neutrons retardés et les durées de vie des neutrons prompts.

3. DISTRIBUTIONS DE PUISSANCE

La démonstration de sûreté repose dans une certaine mesure sur les distributions de puissance qui ont été calculées. En ce qui concerne la qualification des outils utilisés dans ce but, l'exactitude des calculs de distribution de puissance est confirmée principalement par les cartes de flux réalisées dans les centrales nucléaires existantes, que ce soit en cours de cycle ou lors des essais spécifiques réalisés au cours du premier démarrage de ces dernières.

3.1. DÉFINITIONS

Les distributions de puissance sont caractérisées par des facteurs de point chaud. Ces facteurs correspondent au pic de puissance des pastilles dans le cœur du réacteur et de l'énergie totale produite dans un canal de refroidissement, et ils sont exprimés en termes de quantités relatives à la conception nucléaire ou thermique.

Les facteurs employés pour caractériser les distributions de puissance dans ce chapitre sont définis de la façon suivante, selon les définitions françaises des paramètres :

- $F_{xy}(z)$ est le facteur de pic radial de point chaud dans le plan de cote z , défini comme le rapport de la puissance linéique maximale à la puissance linéique moyenne dans ce plan ;
- $P(z)$ est la distribution axiale de la puissance relative moyenne, définie comme le rapport de la puissance linéique moyenne dans le plan de cote z à la puissance linéique moyenne des crayons dans tout le cœur ;
- $Q(z)$ est la puissance linéique relative maximale à la cote z , définie comme la densité de puissance linéique locale maximale des crayons de combustible à la cote z divisée par la densité de puissance linéique moyenne :
 $Q(z) = F_{xy}(z) \times P(z)$
- F_Q est le facteur de point chaud, défini comme la densité de puissance linéique locale maximale divisée par la densité de puissance linéique moyenne :
 $F_Q = \text{Max } Q(z)$, sans incertitudes ni pénalités

- Les incertitudes et pénalités suivantes sont appliquées aux valeurs de conception du F_Q :

-

$$F_Q^E$$

= facteur d'incertitude technologique de point chaud, est la provision sur le flux de chaleur requise pour accommoder les tolérances de fabrication. Ce facteur technologique permet de tenir compte des dispersions de fabrication en ce qui concerne l'enrichissement, la densité et le diamètre des pastilles, la surface du crayon combustible et l'excentricité du jeu pastille-gaine [1]. Ces valeurs, qui prennent en compte des provisions définies sur la base du retour d'expérience des dossiers du parc EDF, sont dimensionnées sur la base de calculs effectués pour les cycles P1 à P5 de la gestion EPR FA3 (voir tableau [FIG-4.3.12](#)),

-

$$F_U^N$$

= facteur nucléaire d'incertitude, prenant en compte les incertitudes liées au calcul des distributions de puissance (voir [§ 3.5.1.](#)),

- F_{cal} = incertitude sur le niveau de puissance [1],
 - F_B = pénalité de fléchissement des crayons, tenant compte d'une sur modération locale due à l'arcure éventuelle des crayons de combustible [1] voir [Réf \[5\]](#),
 - F_{xe} = pénalité permettant de prendre en compte les oscillations azimutales et radiales du xénon qui ne déclenchent pas l'alarme de déséquilibre azimutal de puissance ([1] pour une alarme fixée [1] : voir [Réf \[6\]](#)),
 - Des pénalités pour couvrir le phénomène de tilt (voir [§ 3.2.](#)), le fonctionnement prolongé à puissance réduite (FPPR) et le fonctionnement en suivi de charge et télé réglage (SCTR), ainsi que des provisions sont également prises en compte.
- Le facteur de pic défini pour le dimensionnement et comprenant les incertitudes et les pénalités, est le suivant :

$$F_Q^D = F_Q \times F_i$$

avec F_i = facteur d'incertitude totale prenant en compte tous les facteurs mentionnés ci-dessus, soit :

[1]

-

$$F_{\Delta H}^N$$

est le facteur de pic d'élévation d'enthalpie nucléaire ; il est défini comme le rapport entre l'intégrale de la puissance linéique du crayon ayant la puissance intégrée la plus élevée, et la puissance moyenne produite par crayon dans le cœur ;

-

Les incertitudes et pénalités suivantes sont appliquées aux valeurs de conception du $F_{\Delta H}^N$:

•

$$F_U^N$$

= facteur nucléaire d'incertitude, prenant en compte les incertitudes liées au calcul des distributions de puissance (voir § 3.5.1.),

- F_{xe} = pénalité permettant de prendre en compte les oscillations azimutales et radiales du xénon qui ne déclenchent pas l'alarme de déséquilibre azimutal de puissance (□ pour une alarme fixée à □ : voir Réf [6]),
- $F_{\text{désalignement}}$ = pénalité permettant de prendre en compte le désalignement d'une grappe □,
- Des pénalités pour couvrir le phénomène de tilt (voir § 3.2.), le fonctionnement prolongé à puissance réduite (FPPR) et le fonctionnement en suivi de charge et télé réglage (SCTR), ainsi que des provisions sont également prises en compte.

- Le facteur de pic d'élévation d'enthalpie nucléaire défini pour le dimensionnement et comprenant les incertitudes et les pénalités, est le suivant :

$$F_{\Delta H}^{DM} = F_{\Delta H}^M \times F_I$$

avec F_I = facteur d'incertitude totale prenant en compte tous les facteurs mentionnés ci-dessus, soit :

□

Les tolérances de fabrication, la distribution de puissance du canal chaud et la distribution de puissance des canaux qui l'environnent sont traitées explicitement dans le calcul du RFTC décrit dans le sous-chapitre relatif au dimensionnement thermo-hydraulique (voir sous-chapitre 4.4).

3.2. DISTRIBUTION RADIALE DE PUISSANCE

La forme de la distribution de puissance dans les plans horizontaux du cœur est fonction :

- du plan de chargement des assemblages combustible,
- de l'endroit où se trouvent les crayons empoisonnés,
- de la position des grappes de contrôle,
- du taux d'épuisement du combustible,
- du niveau de puissance et des effets de densité du modérateur,

- de la concentration et de la répartition du xénon et du samarium.

En revanche, en fonctionnement nominal, les effets dus à la distribution non uniforme du débit de réfrigérant primaire en entrée cœur sont négligeables.

Les figures [FIG-4.3.7](#) à [FIG-4.3.12](#) donnent les distributions radiales de puissance par assemblage pour un quart du cœur à différents taux d'épuisement pour les cycles \square de la première gestion du combustible. Ces distributions sont obtenues en intégrant la puissance nucléaire de chaque assemblage sur la hauteur du cœur.

La puissance du canal chaud du cœur résulte de la superposition de la distribution macroscopique de la puissance dans le cœur et de la distribution par crayon dans l'assemblage. A titre d'illustration, les distributions de puissance par crayon dans l'assemblage, à un Burn-Up de 150 MWj/t et en Fin De Vie naturelle des cycles \square , sont respectivement données pour l'assemblage chaud en figures [FIG-4.3.13](#) à [FIG-4.3.16](#).

Comme la position du canal chaud varie au cours du temps, une seule distribution radiale de puissance dans le cœur est choisie comme référence pour les calculs de RFTC en conception. Cette distribution de puissance de référence est choisie de manière conservatrice en concentrant la puissance dans une zone du cœur, de façon à minimiser les gains dus à la redistribution de l'écoulement. Les puissances des assemblages sont normalisées par rapport à la puissance moyenne du cœur. Comme la distribution fine de puissance autour du canal chaud varie avec le temps, on prend, de manière conservatrice dans l'analyse de RFTC, une distribution de puissance radiale plate dans l'assemblage, et on impose artificiellement au crayon de puissance intégrée maximale la valeur de :

$F_{\Delta H}^{DN}$, définie pour le dimensionnement (voir sous-chapitre 4.4).

Les cartes de flux réalisées sur les centrales nucléaires existantes ont montré que la distribution azimutale de puissance dans le cœur n'est pas totalement symétrique, notamment au démarrage du réacteur. Le déséquilibre de puissance statique entre les différents quadrants du cœur, ou tilt statique, est défini de la manière suivante :

$$Tilt = \max_{i=1,4} \left[\frac{P_i - P_m}{P_m} \right]$$

où :

- P_i est la puissance du quadrant,
- P_m est la puissance du cœur.

Sachant que deux types de quadrants peuvent être définis (quadrants médians et quadrants diagonaux), il en résulte deux types de tilt (tilt médian et tilt diagonal).

La présence du tilt n'est pas due à une cause unique et, en règle générale, la valeur maximale de tilt est obtenue en début de cycle, le tilt diminuant durant l'évolution du cycle.

Les études de conception et les analyses de sûreté sont réalisées sur des modèles de cœur symétriques. Cependant, l'existence du tilt est prise en compte par des pénalités appliquées aux paramètres calculés sur les modèles symétriques. Pour déterminer ces pénalités, des modèles de cœur tenant compte du tilt sont générés. Ces modèles, décrits en [Réf \[6\]](#), tiennent compte d'un déséquilibre azimutal de puissance (diagonal ou médian) \square .

Les effets potentiels du réflecteur lourd de l'EPR sur la distribution de puissance du cœur, et notamment sur la valeur de tilt, ont été analysés. L'impact n'est significatif que pour le premier cycle à basse puissance du fait des caractéristiques particulières de ce plan de chargement (voir [Réf \[7\]](#)) et l'analyse réalisée en [Réf \[8\]](#) montre l'absence de conséquences sur la sûreté.

Par ailleurs, afin d'anticiper un possible dépassement du critère de conformité sur les distributions radiales de puissance assemblage lors du démarrage, un complément à la justification de sûreté, mené sur le premier cycle [1], est réalisé. Un modèle de cœur est donc généré pour tenir compte du déséquilibre de puissance attendu [1]. À la suite de la génération de ce modèle de cœur recalé, des vérifications et analyses vis-à-vis des critères mentionnés dans le Rapport de Sûreté sont effectuées dans le document en [Réf \[11\]](#).

Ces analyses permettent de démontrer que la suffisance et la validité de la démonstration de sûreté ne sont pas remises en cause par le modèle recalé du premier cycle [1].

3.3. DISTRIBUTION AXIALE OU DISTRIBUTION DE PUISSANCE 3D

La forme de la distribution axiale de puissance dépend principalement :

- de la position des grappes de contrôle,
- du niveau de puissance,
- de la distribution axiale du xénon,
- des effets de contre-réactions dues aux effets Doppler et de densité du modérateur,
- du taux d'épuisement du combustible,
- de la conception axiale de l'assemblage combustible (pour l'optimisation de la distribution axiale de puissance).

A titre d'illustration, les formes axiales de puissance moyenne dans le cœur à un Burn-Up de 150 MWj/t et en Fin De Vie naturelle des cycles [1] sont présentées en figures [FIG-4.3.17](#) à [FIG-4.3.20](#).

Des signaux sont produits grâce à l'instrumentation incore et excore. Ces signaux servent à contrôler de façon automatique le cœur en fonctionnement normal via la reconstruction de la distribution axiale moyenne de puissance du cœur, qui est caractérisée par l'Axial Offset ou par le déséquilibre axial ΔI :

$$\text{Axial Offset} = \text{AO} = \frac{P_H - P_B}{P_H + P_B}$$

Avec P_H et P_B : fractions de puissance respectivement produites par les moitiés supérieure et inférieure du cœur.

$$\Delta I = \frac{P_H - P_B}{(P_H + P_B)_{\text{nominal}}} = \text{AO} * \text{Pr}$$

Avec Pr : niveau de puissance relatif par comparaison avec le niveau de puissance nominal.

Les signaux de l'instrumentation incore servent également à reconstruire la puissance linéique maximale dans le cœur.

3.4. DISTRIBUTIONS DE PUISSANCE LIMITATIVES

La gestion du combustible et l'emplacement des grappes de contrôle sont choisis de manière à limiter les perturbations de la distribution radiale de puissance pendant le fonctionnement normal.

L'efficacité et l'insertion des grappes de contrôle sont choisies de manière à limiter la perturbation de la distribution axiale de puissance.

Afin de limiter les oscillations axiales de puissance dues au xénon, la distribution axiale de puissance est contrôlée en maintenant l'Axial Offset dans une plage de fonctionnement autorisée autour d'une valeur cible. Ceci minimise les effets transitoires du xénon sur la forme axiale de puissance puisque la distribution du xénon reste en phase avec la distribution de la puissance.

Les distributions de puissance les plus limitatives qui puissent arriver au cours du fonctionnement normal (PCC-1), doivent être considérées comme état initial pour les événements PCC-2 à PCC-4. Ces distributions de puissance tiennent compte de la surveillance sur la densité de puissance linéique maximale $Q(z)$ et sur le RFTC, en respectant les valeurs limites sur ces paramètres. L'instrumentation et les fonctions de contrôle sont mises en place pour garantir que ces limites sont bien respectées.

3.5. VÉRIFICATION EXPÉRIMENTALE

3.5.1. Analyse des distributions de puissance

La qualification du code de calcul de cœur \square (décrit en Annexe 4) repose sur l'exploitation des comparaisons calcul/mesure obtenues sur une base expérimentale constituée d'expériences critiques, du retour d'expérience des REP et d'essais spéciaux. Les écarts calcul/mesure déduits du traitement des cartes de flux ont été traités de manière à établir les incertitudes de calcul, décrites ci-dessous, sur la puissance locale et sur la puissance intégrale crayon (voir [Réf \[9\]](#)) :

\square

3.5.2. Conformité du cœur

Des séries de mesures physiques sont effectuées sur le premier cœur. Le principal objectif de ces mesures est de permettre une validation des méthodes de calcul utilisées pour les prévisions établies de manière théorique.

Les mesures de la réactivité du cœur, de l'efficacité des grappes de contrôle et de la distribution de puissance permettent d'avoir une vérification expérimentale des calculs et de la conformité du cœur.

3.5.3. Surveillance en ligne et systèmes de protection

Les informations concernant l'instrumentation de surveillance du cœur sont résumées dans le sous-chapitre relatif à la conception thermo-hydraulique (voir sous-chapitre 4.4). L'instrumentation incore et excore permet de contrôler correctement les distributions de puissance nécessaires à la surveillance en ligne et aux systèmes de protection. Les descriptions des systèmes de surveillance en ligne et de protection se trouvent dans les sous-chapitres 7.2 et 7.3.

4. COEFFICIENTS DE RÉACTIVITÉ

Les caractéristiques cinétiques du cœur du réacteur gouvernent la réponse du cœur à des changements d'états de la centrale ou à des actions des opérateurs en fonctionnement normal, ainsi que la réponse du cœur lors d'événements. Les coefficients de réactivité reflètent les variations du facteur de multiplication des neutrons dues à un changement d'un paramètre de fonctionnement de la centrale, par exemple la puissance, la température du modérateur ou la température du combustible. Comme les coefficients de réactivité changent au cours du cycle, on utilise des plages de coefficients pour l'analyse des événements, de façon à déterminer le comportement du cœur pendant tout le cycle.

Des informations quantitatives sont fournies dans les sections suivantes pour les coefficients de réactivité calculés, notamment le coefficient Doppler, les coefficients modérateur (densité, température) et le coefficient de puissance.

4.1. COEFFICIENT DE TEMPÉRATURE DU COMBUSTIBLE (DOPPLER)

Le coefficient de température du combustible (Doppler) est défini comme étant le changement de réactivité induit par une variation d'un degré Celsius de la température effective² du combustible. Pour l'essentiel, il mesure l'élargissement Doppler des résonances de l'U-238 et du Pu-240. Une hausse de la température du combustible accroît les sections effectives d'absorption résonnante du combustible, ce qui induit une baisse de réactivité en rapport.

A titre d'illustration, le coefficient Doppler-température en fonction de la température effective du combustible est donné pour le cycle  et pour le cycle d'équilibre  de la première gestion du combustible à un Burn-Up de 150 MWj/t et Fin De Vie naturelle (voir figures [FIG-4.3.21](#) et [FIG-4.3.22](#)).

Quand la puissance augmente et atteint une valeur non négligeable, la température effective du combustible n'est plus égale à la température du modérateur mais varie en fonction de la puissance du cœur. Cet effet est pris en compte dans le coefficient Doppler-puissance. L'intégrale de la courbe différentielle du coefficient Doppler-puissance en fonction de la puissance relative, constitue la contribution de l'effet Doppler au défaut de puissance qui sera défini plus tard (en considérant que la température du modérateur varie selon le diagramme de fonctionnement) (voir [§ 4.3.](#)).

4.2. COEFFICIENTS MODÉRATEUR

Le coefficient modérateur mesure la variation de réactivité due à une modification de paramètres spécifiques du fluide de refroidissement comme la densité ou la température. Les coefficients ainsi obtenus sont les coefficients de densité et de température du modérateur.

1) Coefficients de densité et de température du modérateur

Le coefficient de température du modérateur est défini comme correspondant à la variation de réactivité induite par une variation d'un degré Celsius de la température du modérateur. Le coefficient de densité du modérateur est défini, quant à lui, comme correspondant à la variation de réactivité induite par une variation d'un g/cm³ de la densité du modérateur. En général, les effets du changement de densité du modérateur ainsi que ceux du changement de température sont pris en compte ensemble. Une baisse de la densité du modérateur entraîne une diminution de la modulation, ce qui donne un coefficient modérateur négatif. Une hausse de la température du fluide de refroidissement à densité constante (qui peut être obtenue par une élévation de pression), conduit à durcir le spectre de neutrons et résulte en un accroissement de l'absorption dans les résonances de l'U-238, du Pu-240 et d'autres isotopes. Le durcissement du spectre provoque également une baisse du rapport fission/capture dans l'U-235 et le Pu-239. Ces deux effets rendent le coefficient du modérateur encore plus négatif. Comme la densité de l'eau varie plus rapidement que la température elle-même lorsque celle-ci s'élève, le coefficient de température (de densité) du modérateur devient encore plus négatif quand la température augmente.

Le bore soluble utilisé dans le réacteur comme moyen de contrôle de la réactivité a également un effet sur le coefficient de densité du modérateur dans la mesure où la densité du bore soluble décroît quand la densité de l'eau décroît suite à une augmentation de la température du fluide de refroidissement. La baisse de concentration en bore soluble introduit une composante positive dans le coefficient modérateur.

Ainsi, si la concentration en bore soluble est suffisamment importante, il arrive un moment où la valeur nette du coefficient devient positive. Cependant, grâce à la présence de poison consommable, la concentration initiale de bore à chaud est suffisamment faible pour que le coefficient de température du modérateur satisfasse le critère indiqué au [§ 1.2.](#)

Avec l'épuisement, le coefficient du modérateur devient davantage négatif principalement en raison de la dilution de l'acide borique mais aussi, pour une part significative, à cause des effets d'accumulation du plutonium et des produits de fission.

A titre d'illustration, les coefficients de température (de densité) du modérateur sont présentés pour le cycle  et pour le cycle d'équilibre  de la première gestion du combustible au tableau [TAB-4.3.3](#) pour les configurations du cœur suivantes :

2. Pour une distribution donnée de température dans la pastille de combustible, la température effective est la température uniforme qui conduit à la même intégrale d'absorption que la distribution considérée.

- Toutes grappes extraites, puissance nulle à chaud et puissance nominale avec la concentration en bore critique de puissance nominale et la concentration en xénon de puissance nominale, à un Burn-Up de 150 MWj/t et en Fin De Vie naturelle,
- Toutes grappes extraites, puissance nulle à chaud avec la concentration en bore critique de puissance nulle à chaud et une concentration en xénon nulle, à un Burn-Up de 150 MWj/t.

2) Coefficient de vide du modérateur

Le coefficient de vide du modérateur traduit la variation du facteur de multiplication des neutrons due à la présence de bulles dans le modérateur. Dans un REP, ce coefficient a peu d'impact dans l'analyse de sûreté dans le domaine de dimensionnement en raison de la faible proportion de vide dans le fluide de refroidissement. La proportion de vide dans le cœur est inférieure à un demi pour cent et elle est due à l'ébullition locale ou statistique. Typiquement, la valeur du coefficient de vide est proche de 0 pcm/pourcent de vide en Fin De Vie naturelle et aux températures de fonctionnement normal. Le coefficient de vide, négatif à la température de fonctionnement, devient encore plus négatif avec l'épuisement du combustible.

4.3. COEFFICIENT DE PUISSANCE

L'effet combiné des changements de température du modérateur et de température du combustible en fonction du niveau de puissance du cœur, en tenant compte du fait que la température du modérateur varie selon le programme de température (voir sous-chapitre 4.4), est appelé coefficient de puissance et il est exprimé en terme de variation de réactivité par pourcent de variation de puissance.

Le défaut de puissance (effet de réactivité intégral) à un Burn-Up de 150 MWj/t et en Fin De Vie naturelle, avec une concentration en bore critique de puissance nominale et une concentration en xénon de puissance nominale, est présenté au tableau [TAB-4.3.3](#) pour le cycle 1 et pour le cycle d'équilibre 2 de la première gestion du combustible. Il devient plus négatif avec l'épuisement, reflétant l'effet combiné des coefficients de température du modérateur et du combustible.

4.4. COEFFICIENTS DE RÉACTIVITÉ UTILISÉS DANS L'ANALYSE DES ÉVÉNEMENTS

Le tableau [TAB-4.3.3](#) donne les valeurs limitatives de coefficients de réactivité. Ces valeurs sont utilisées comme enveloppes de conception pour l'analyse des événements. La valeur précise de chaque coefficient employé dans l'analyse dépend du fait que l'événement auquel on s'intéresse est examiné en début ou en Fin De Vie naturelle, du fait que les coefficients les plus négatifs ou les plus positifs sont pénalisants, et du fait que la non-uniformité spatiale doit être prise en compte dans l'analyse. Au cours de l'analyse des événements, on utilise des valeurs de coefficients conservatives, en considérant les différents aspects de l'analyse.

Les coefficients de réactivité présentés dans les [§ 4.1.](#) à [§ 4.3.](#) sont des valeurs réalistes et calculées pour le cycle 1 et pour le cycle d'équilibre 2 de la première gestion du combustible. Les valeurs limitatives données au tableau [TAB-4.3.3](#) sont définies à partir des coefficients de réactivité réalistes calculés pour tous les cycles de la première gestion, en incluant les incertitudes de calcul mentionnées au [§ 10.6.](#), ainsi que des pénalités pour couvrir le phénomène de tilt, le fonctionnement en FPPR et en SCTR, et des provisions. Les valeurs les plus positives comme les valeurs les plus négatives sont ensuite sélectionnées pour constituer l'enveloppe des valeurs de conception à utiliser dans l'analyse des événements.

La nécessité de réévaluer un événement au cours d'un cycle ultérieur dépend du fait que les coefficients de réactivité correspondant à ce cycle entrent ou non dans l'enveloppe utilisée dans l'analyse, en tenant compte des incertitudes de calcul et des pénalités.

5. CONTRÔLE DU CŒUR

5.1. EXIGENCES ET PRINCIPES DE CONTRÔLE

5.1.1. Épuisement

L'excédent de réactivité, à chaque début de cycle, est suffisamment élevé pour maintenir le cœur critique à pleine puissance, en compensant l'épuisement du combustible et la formation des produits de fission tout au long du cycle. La réactivité est contrôlée par l'ajout de bore soluble au fluide de refroidissement, et par les poisons consommables.

5.1.2. Empoisonnement xénon et empoisonnement samarium

Les changements de concentration de xénon et de samarium dans le cœur se produisent à un rythme suffisamment lent, même à la suite de changements rapides de niveaux de puissance, pour que l'on puisse contrôler le changement de réactivité qui en résulte en modifiant la concentration de bore soluble.

5.1.3. Démarrage au pic xénon

La compensation de l'apparition d'un pic xénon se fait à l'aide du système de contrôle par le bore. Un démarrage au pic xénon est possible en associant le déplacement des grappes et la dilution du bore. La dilution du bore peut se faire à tout moment, y compris pendant la période d'arrêt, à partir du moment où la sous-criticité requise pour l'arrêt est maintenue.

5.1.4. Suivi de charge et contrôle du xénon

Au cours des manœuvres de suivi de charge, les changements de puissance sont effectués en déplaçant les grappes de contrôle et en diluant/boriquant avec le système de contrôle par le bore. Le déplacement des grappes de contrôle est restreint par les limites d'insertion des grappes de contrôle. La distribution de puissance est maintenue dans des limites acceptables grâce à la position des grappes de contrôle. Les changements de réactivité dus aux variations de concentration du xénon peuvent être contrôlés par déplacement des grappes et/ou par modification de la concentration de bore soluble.

5.1.5. Sous-criticité et marge d'arrêt

Pour garantir une marge d'arrêt suffisante dans les conditions où il est nécessaire de faire descendre la température du réfrigérant à la température ambiante, on ajoute du bore soluble au fluide de refroidissement, de façon à compléter l'empoisonnement du cœur obtenu par les grappes. Pour tous les états du cœur, y compris l'arrêt pour rechargement, la concentration en bore est bien inférieure à la limite de solubilité.

Pour maintenir le cœur à l'état d'arrêt à chaud ou à froid, il est nécessaire de garantir la sous-criticité du cœur dans les états d'arrêt opérationnel. Cependant, des événements peuvent survenir à partir de ces états. Il est donc nécessaire de maintenir une certaine sous-criticité afin de prévenir les conséquences de ces événements.

Les cas à prendre en considération sont les suivants :

- état d'arrêt opérationnel à puissance nulle, à chaud : La sous-criticité minimale requise doit couvrir les conséquences de l'éjection de grappe, du retrait incontrôlé de groupe à puissance nulle et de la rupture de tuyauterie vapeur.
- état d'arrêt opérationnel à puissance nulle à froid, cuve fermée : La sous-criticité minimale requise doit couvrir les conséquences de l'éjection de grappe.
- état d'arrêt opérationnel à puissance nulle à froid, cuve ouverte : La sous-criticité minimale requise doit couvrir les conséquences du scénario prenant en compte le retrait intempestif de toutes les grappes lors de l'ouverture du couvercle de cuve, ainsi que les situations de non-conformité du cœur (voir section 15.2.3h).

En cas d'arrêt automatique du réacteur, il est nécessaire de démontrer la capacité à réaliser l'arrêt du cœur jusqu'à une puissance nulle à chaud en supposant le xénon inchangé. En cas de refroidissement partiel automatique, le système d'injection de bore supplémentaire (RBS) n'est pas mis en route automatiquement, les grappes de contrôle sont donc nécessaires pour garantir la sous-criticité du cœur jusqu'à la fin de ce transitoire de refroidissement. L'apport de réactivité résultant de la réduction du niveau de puissance vient des apports du Doppler, de la variation de température moyenne du modérateur, de la redistribution des flux, et de la réduction de la proportion de vide, comme exposé au § 6. La sous-criticité du cœur est garantie en comparant l'efficacité des grappes disponibles, en tenant compte de la grappe coincée, avec l'antiréactivité requise pour le contrôle et la protection. En règle générale, l'exigence sur le contrôle de réactivité apparaît comme étant la plus contraignante à la fin du cycle, lorsque le coefficient de température du modérateur atteint sa valeur la plus négative, ce qui est reflété par la valeur maximum du défaut de puissance à ce moment là.

5.2. MOYENS DE CONTRÔLE

La réactivité du cœur est contrôlée au moyen d'un poison chimique dissous dans le fluide de refroidissement, de grappes et de crayons de poison consommable, tels que décrits ci-dessous.

5.2.1. Poison chimique

Du bore en solution sous forme d'acide borique est employé pour contrôler les variations relativement lentes de réactivité associées à :

- 1) la variation de température du modérateur lors du passage de l'arrêt à froid (à température ambiante) à l'arrêt à chaud,
- 2) la variation d'empoisonnement xénon et d'empoisonnement samarium résultant d'un changement du niveau de puissance ou d'un changement de position des grappes,
- 3) l'excédent de réactivité requis pour compenser les effets de l'appauvrissement de l'inventaire fissile et de l'accumulation des produits de fission à longue durée de vie,
- 4) l'épuisement du poison consommable.

Les évolutions des concentrations en bore durant le cycle, exprimées en ppm de bore naturel, sont présentées dans les tableaux [TAB-4.3.4](#) et [TAB-4.3.5](#) pour les cycles \square de la première gestion. Néanmoins, le bore employé sera enrichi en B10 \square dans le but d'avoir des concentrations en bore inférieures à \square ppm de bore naturel en début de vie, à la puissance nominale, sans xénon.

5.2.2. Poisons consommables

Les poisons consommables assurent en partie le contrôle de l'excédent de réactivité disponible. Ils permettent ainsi au coefficient de température du modérateur de satisfaire le critère présenté au § 1.2. Cela est obtenu par la diminution du besoin en bore soluble dans le modérateur au début des cycles de combustible, tel que décrit précédemment. Les répartitions de poisons consommables dans le cœur sont présentées dans les schémas de chargement des différents cycles (voir figures [FIG-4.3.5](#) et [FIG-4.3.6](#) pour les cycles \square). Le poison contenu dans les crayons s'épuise progressivement, mais à une vitesse suffisamment lente pour que la concentration critique en bore soluble qui en résulte soit telle que le critère relatif au coefficient de température du modérateur soit toujours respecté.

5.2.3. Grappes d'arrêt et de contrôle

Les grappes sont utilisées pour permettre l'arrêt automatique et le contrôle du réacteur. Elles compensent les variations rapides de réactivité associées à :

- 1) la marge d'arrêt requise à puissance nulle, à chaud et à la fin d'un transitoire de refroidissement partiel, avec une grappe coincée,
- 2) la compensation de la variation de réactivité induite par une augmentation de la puissance, partant de la puissance nulle à chaud (défaut de puissance incluant les effets Doppler et modérateur),

- 3) les variations de concentration en bore, de température du réfrigérant ou de concentration en xénon (avec des grappes ne dépassant pas les limites d'insertion autorisées),
- 4) les rampes de réactivité résultant des variations de niveau de puissance.

L'insertion autorisée des grappes de contrôle à pleine puissance est limitée afin de conserver une marge d'arrêt suffisante. Si le niveau de puissance est réduit, les besoins en antiréactivité sont également réduits et on peut se permettre d'insérer davantage les grappes de contrôle. De plus, les séquences d'insertion des grappes de contrôle déterminées à partir de ces analyses servent à déterminer l'efficacité maximale de la grappe éjectée, en cas d'accident d'éjection de grappe. Les insertions limites des grappes de contrôle sont données dans le sous-chapitre 15.1.

5.3. MODE T DE PILOTAGE

5.3.1. Contrôle du cœur

L'objectif principal du contrôle du cœur est de faciliter l'exploitation en assurant simultanément le contrôle de la température et le contrôle du déséquilibre axial de puissance. Ce contrôle est assuré par le pilotage □ du réacteur EPR FA3 (voir [Réf \[10\]](#)), synthétisé ci-dessous.

Le pilotage repose sur la régulation des paramètres du cœur suivants :

- la température moyenne primaire,
- la distribution de puissance axiale,
- la capacité de retour en puissance par extraction de groupes (Pmax).

La régulation de ces trois paramètres à contrôler s'effectue à partir de mesures réalisées en temps réel. Une action de régulation est demandée lorsque l'un des paramètres précités sort de sa bande morte, même si celui-ci reste dans le domaine de fonctionnement normal délimité par les LCO.

Le contrôle des paramètres du cœur est assuré au moyen de deux actionneurs :

- Les grappes de contrôle, qui permettent des variations rapides de réactivité mais influent sur la distribution de la puissance axiale ;
- Les dilutions et borications, qui ne permettent que des variations lentes de réactivité mais modifient peu la distribution de puissance axiale.

□

Les grappes de contrôle sont affectées aux groupes □ suivant deux configurations appelées séquences (voir figures [FIG-4.3.23](#) et [FIG-4.3.24](#)). L'alternance des séquences tout au long du cycle permet d'optimiser l'épuisement du cœur, d'éviter le phénomène de sous-épuisement local et de minimiser la fatigue des mécanismes de grappes.

Le contrôle du cœur permet la limitation des oscillations de xénon en contrôlant l'Axial Offset en continu.

Le contrôle de l'Axial Offset est assuré à l'intérieur d'une bande de contrôle (appelée bande morte d'Axial Offset) par une logique permettant l'établissement de priorités dans les déplacements des grappes de contrôle. Comme le contrôle de la température moyenne primaire est prioritaire, ce contrôle est garanti même si les déplacements de grappes ne permettent pas de maintenir l'Axial Offset dans sa bande morte à très court terme.

5.3.2. Hypothèses associées au mode T dans la démonstration de sûreté

□

6. EFFICACITÉ DES GRAPPES

Les termes « groupe » et « grappes » sont utilisés indifféremment dans l'ensemble du présent rapport pour désigner un groupement particulier de grappes.

La position axiale des grappes peut être contrôlée manuellement ou automatiquement. Les grappes descendent toutes dans le cœur en cas de déclenchement des signaux d'arrêt automatique du réacteur.

Les calculs de l'efficacité des grappes en fonction du temps, après arrêt automatique du réacteur, prennent en compte la vitesse des grappes et leur efficacité différentielle. Pour la conception nucléaire, de manière conservatrice, l'efficacité des grappes en fonction de leur position est calculée [1]. La courbe d'efficacité normalisée des grappes en fonction de leur insertion relative se trouve dans le sous-chapitre 15.1.

La marge d'arrêt est définie comme étant le niveau de sous-criticité du cœur lors d'un arrêt à chaud ou à la fin d'un transitoire de refroidissement partiel si toutes les grappes chutent, [1]. La description de la méthode de calcul de la marge d'arrêt est présentée ci-après.

La méthodologie [1] basée sur un calcul couplé des contre-réactions et de l'effet de redistribution permet d'effectuer le calcul de la marge d'arrêt à partir d'un état initial [1] représentatif de l'état initial de la tranche (grappes insérées en puissance).

La méthode repose sur le calcul du bilan de réactivité en une seule étape ($\Delta\rho_{BE}$) entre :

- l'état initial pénalisant appartenant au domaine de fonctionnement normal,
- l'état final correspondant à la situation après arrêt automatique du réacteur au cours duquel les grappes ont chuté [1].

Les incertitudes et pénalités sont ensuite ajoutées à ce bilan de la manière suivante :

[1]

Où :

- $\Delta\rho_{grappes}$ représente l'antiréactivité des grappes réellement présentes dans le cœur, c'est-à-dire l'antiréactivité des N-1 grappes, à puissance nulle,
- I_{mod} représente l'incertitude sur la température du modérateur,
- I_{dop} représente l'incertitude liée à l'effet Doppler,
- $I_{puis+temp}$ représente l'incertitude cumulée liée à l'incertitude sur le niveau de puissance [1] et sur la température moyenne du modérateur [1],
- P_{usure} représente la pénalité liée à l'usure neutronique des grappes,
- P_{tilt} , P_{FPPR} et P_{SCTR} sont les pénalités liées au phénomène de tilt et au fonctionnement en FPPR ou SCTR.

L'état initial influence directement le bilan de marge d'arrêt. L'état initial pénalisant est caractérisé par :

[1]

Les marges d'arrêt sont calculées pour tous les cycles de la première gestion en Fin De Vie naturelle et en prolongation de cycle [1] (voir tableaux [TAB-4.3.7](#) et [TAB-4.3.8](#)).

Le critère de conception concerne la marge d'arrêt à [1]°C qui doit être supérieure à [1] pcm. Les marges d'arrêt à [1]°C sont utilisées dans le cadre des études de Rupture de Tuyauterie Vapeur (dans le cadre de ces études, des hypothèses spécifiques ont pu être prises en compte par rapport aux marges d'arrêt à 303°C présentées dans le présent document).

Les insertions limites (IL) correspondant au jeu d'hypothèses intermédiaire (voir annexe 15B) ont été conservées pour ces calculs de β . Cette hypothèse est en effet conservative, puisque les IL correspondant à l'état final de conception (voir sous-chapitre 15.1) ont été relevées par rapport à celle du jeu d'hypothèses intermédiaire.

7. SOUS-CRITICITÉ DES ENTREPOSAGES D'ASSEMBLAGES COMBUSTIBLES DANS LE BÂTIMENT COMBUSTIBLE

Les installations d'entreposage du combustible dans le Bâtiment Combustible (à sec et en piscine) sont conçues, réalisées et exploitées de façon à éviter tout accident de criticité. La sous-criticité doit ainsi être assurée au cours de l'exploitation normale, et pour différents événements, pouvant résulter d'une immersion en eau du râtelier d'entreposage à sec, d'une dilution de la concentration en bore de la piscine, de la chute d'un assemblage combustible ou du mauvais positionnement d'un assemblage combustible.

Pour l'entreposage sous eau, les études de criticité en BK sont réalisées en respectant les règles et hypothèses suivantes (voir [Réf \[1\]](#)) :

- Les calculs sont effectués avec l'ensemble des alvéoles occupées par des assemblages combustibles sans grappe de contrôle. On considère des assemblages combustibles UO₂ à l'enrichissement maximal autorisé (soit 5%) et MOX (teneur et vecteur Pu définis en [Réf \[1\]](#)), avec un taux d'épuisement conférant au combustible sa réactivité maximale (début de vie).
- La configuration de l'assemblage β . Les configurations pénalisantes sont respectivement les configurations β (voir figure [FIG-4.3.25](#)).
- Les éventuels matériaux neutrophages installés à demeure dans la structure de râtelier peuvent être pris en compte dans les calculs.
- Les calculs du coefficient de multiplication neutronique keff prennent en compte :
 - l'incertitude technologique U_T relative aux tolérances de fabrication concernant différentes grandeurs physiques et géométriques qui interviennent dans le calcul (notamment les caractéristiques dimensionnelles des assemblages et des structures d'entreposage),
 - l'incertitude de modélisation U_M (liée à la qualification des codes),
 - l'incertitude statistique U_S liée à l'utilisation de méthodes stochastiques, devant garantir un intervalle de confiance d'au moins 95%.
- Pour les différentes situations étudiées en piscine (sauf cas de la dilution accidentelle), une concentration en bore de β ppm (bore naturel) est prise en compte. Cette valeur est inférieure à la valeur minimale requise pour l'IRWST.
- Critère de sous-criticité :
On définit le coefficient k_{calc} comme le coefficient de multiplication neutronique effectif calculé avec le code β pour des caractéristiques physiques et géométriques pénalisantes. β
Le critère est respecté si les conditions suivantes sont satisfaites :
 - $k_{calc} + U_M + U_S \leq 0,95$ en fonctionnement normal (piscine en eau borée),
 - $k_{calc} + U_M + U_S \leq \beta$ pour les différents événements (dilution de la concentration en bore de la piscine, chute d'un assemblage combustible ou mauvais positionnement d'un assemblage combustible).

Les principaux résultats de ces études de sous-criticité en BK sont donnés dans le tableau [TAB-4.3.9](#), pour les situations normales et accidentelles.

8. COURBES DE CHALEUR RÉSIDUELLE

La chaleur résiduelle dans un cœur sous-critique est composée :

- des fissions résiduelles dues aux neutrons retardés (terme A),
- de la désintégration des produits de capture U239 et Np239 (terme B),
- de la désintégration des produits de fission et des actinides à l'exception de l'U239 et du Np239 (terme C).

8.1. TERME A

La puissance résiduelle de fission en fonction du temps après l'arrêt dépend des caractéristiques des neutrons retardés et du facteur de multiplication effectif.

La variation du facteur de multiplication en fonction du temps après déclenchement d'un signal d'arrêt automatique du réacteur dépend des caractéristiques de l'arrêt automatique du réacteur et des paramètres thermo-hydrauliques du cœur.

Ce terme A est évalué pour la plupart des événements en utilisant un modèle neutronique cinétique.

Pour certains événements comme la rupture de tube de générateur de vapeur, le terme A est une donnée d'entrée générée par une simulation découplée et conservatrice de l'arrêt automatique du réacteur.

Le terme A calculé pour la première gestion du combustible est donné dans le sous-chapitre 15.1.

8.2. TERME B + C

L'évolution en fonction du temps de la puissance résiduelle d'un cœur à l'équilibre est présentée en figure [FIG-4.3.26](#), pour des temps allant d'une seconde à un mois après l'arrêt du réacteur, pour la première gestion. Cette puissance résiduelle est notamment utilisée pour les études PCC (voir sous-chapitre 15.1).

D'autres valeurs de puissance résiduelle sont utilisées pour le dimensionnement des gros composants et du système de refroidissement de la piscine de stockage : ces valeurs enveloppent les valeurs calculées pour un ensemble varié de gestions du combustible définies dans les premières phases de conception du réacteur (voir [§ 2.](#)).

Pour finir, la puissance résiduelle utilisée pour les études accident grave est présentée à la section 19.2.2.1.

9. IRRADIATION DE LA CUVE ET ÉCHAUFFEMENT GAMMA DU RÉFLECTEUR LOURD

Les matériels servant à atténuer les neutrons issus du cœur et les rayons gamma issus à la fois du cœur et des composants structurels sont le réflecteur lourd, l'enveloppe de cœur et l'eau de l'espace annulaire, qui se trouvent tous dans la région située entre le cœur et la cuve du réacteur.

En général, on utilise des codes faisant appel à la théorie de la diffusion des neutrons à peu de groupes et à l'analyse nodale, pour déterminer les distributions de puissance de fission dans le cœur actif, et la précision de ces calculs est vérifiée par des mesures effectuées à l'intérieur du cœur sur les réacteurs en fonctionnement. Les informations obtenues par ces calculs sur la puissance dégagée dans les différentes zones du cœur, et sur la distribution fine de puissance crayon par crayon, sont ensuite utilisées comme informations sur les sources à imposer dans les calculs de transport à deux dimensions qui permettent de calculer les distributions de flux dans tout le réacteur, et non plus seulement dans le cœur.

Le spectre et la distribution des flux de neutrons dans les divers composants structurels varient de manière importante de la sortie du cœur à la cuve du réacteur. Des valeurs typiques de distribution du spectre et de flux de neutrons sont présentées au tableau [TAB-4.3.10](#). Les valeurs de flux relatives à la paroi intérieure de la cuve sont utilisées pour les prévisions d'irradiation à long terme, et pour établir des corrélations avec les estimations des dommages causés par les radiations. Le programme de

surveillance de l'irradiation utilise des échantillons réels pour vérifier l'exactitude des calculs de flux au niveau de la cuve.

En ce qui concerne l'échauffement gamma du réflecteur lourd, des valeurs typiques à court terme et à long terme sont présentées au tableau [TAB-4.3.11](#). Ces valeurs sont utilisées pour déterminer les distributions de température et les déformations dans le réflecteur lourd, et ainsi en vérifier le bon dimensionnement mécanique.

Les valeurs données précédemment sont relatives à des analyses de cycles de type OUT/IN, caractérisés par une puissance de \square MWth et par du combustible UO₂. Vis-à-vis de la fluence cuve et de l'échauffement gamma dans le réflecteur lourd, ces caractéristiques couvrent de la première gestion du combustible en particulier du fait du niveau de puissance cœur augmenté et de son caractère OUT/IN.

10. MÉTHODES ET OUTILS

10.1. GÉNÉRATION DES BIBLIOTHÈQUES DE DONNÉES MACROSCOPIQUES

Le code \square permet de générer les sections efficaces macroscopiques et microscopiques homogénéisées sur l'assemblage et condensées à \square , à utiliser dans le code de diffusion \square . Il est décrit dans l'Annexe 4.

10.2. CALCULS DE CŒUR

Les calculs de cœur sont effectués avec le code \square , décrit dans l'Annexe 4.

\square

10.3. CALCULS DE CHALEUR RÉSIDUELLE

\square

10.4. CALCULS DE FLUENCE CUVE ET D'ÉCHAUFFEMENT GAMMA DANS LE RÉFLECTEUR LOURD

\square

10.5. CALCULS DE SOUS-CRITICITÉ DES ENTREPOSAGES D'ASSEMBLAGES COMBUSTIBLES DANS LE BÂTIMENT COMBUSTIBLE

\square

10.6. INCERTITUDES

Les incertitudes à appliquer pour l'analyse de sûreté sont les suivantes :

\square

LISTE DES RÉFÉRENCES

[1] EPR FA3 – Underwater fuel storage racks neutronic calculation

Note Framatome – NEPC-F DC 33 C

[2] Réacteurs électronucléaires – EDF – Palier 1300 MWe – Gestion de combustible Galice

Courrier ASN DCN-0382 2009

[3] EPR FA3 – Respect des exigences de stabilité du cœur associées à la conception neutronique

Note Framatome – D02-ARV-01-080-123 A

[4] EPR FA3 – Première gestion du combustible

Note Framatome – D02-ARV-01-041-911 A

[5] Phénomène de fléchissement des crayons combustibles – évaluation de l'incertitude sur le facteur de point chaud

Note EDF – D305915017324

[6] EPR FA3 – Première gestion du combustible – Note de synthèse sur le tilt

Note Framatome – PEPC-F DC 26 F

[7] EPR FA3 – Caractérisation de l'effet du réflecteur lourd sur le tilt

Note Framatome – D02-ARV-01-035-118 B

[8] EPR FA3 – Première gestion du combustible – Justification de la sûreté du cycle 1 avec une valeur de tilt augmentée entre 0 et 25%PN lors de la première montée en puissance

Note Framatome – D02-ARV-01-035-120 D

[9] Note de synthèse de qualification SCIENCE V2

Note Framatome – EPD DC 349 I

[10] EPR FA3 – Description du pilotage mode T et justification de la prise en compte dans les études de sûreté

Note Framatome – D02-ARV-01-079-589 A

[11] EPR FA3 – REX de démarrage EPR – Justification de la sûreté du premier cycle avec une déformation de la distribution radiale de puissance

Note Framatome D02-ARV-01-140-405 A



RAPPORT DE SURETE

— DE FLAMANVILLE 3 —

Version Publique

Edition DEMANDE DE MISE EN SERVICE

CHAPITRE 4

SECTION 3

PAGE 30/71

CENTRALES NUCLÉAIRES

Palier EPR

TAB-4.3.1 PARAMÈTRES DE CONCEPTION NUCLÉAIRE

□

TAB-4.3.2 DESCRIPTION DU CŒUR DU RÉACTEUR

<p>- Cœur actif (dimensions à froid ⁵) :</p> <p><i>Diamètre équivalent (mm)</i></p> <p><i>Hauteur active moyenne du combustible du cœur (mm)</i></p> <p><i>Rapport hauteur/diamètre</i></p> <p><i>Surface totale (cm²)</i></p>	<p>3767</p> <p>4200</p> <p>1,115</p> <p>111440</p>
<p>- Réflecteur lourd radial :</p> <p><i>Épaisseur (mm)</i></p> <p><i>Composition (% volume)</i></p>	<p>Entre 77 et 297 (en moyenne 194)</p> <p>□</p>
<p>- Assemblages combustibles (dimensions à froid ⁵) :</p> <p><i>Nombre</i></p> <p><i>Réseau de crayons</i></p> <p><i>Nombre de crayons par assemblage</i></p> <p><i>Pas du réseau (mm)</i></p> <p><i>Dimensions transversales totales (mm)</i></p> <p><i>Poids du combustible par assemblage (kg)</i></p> <p><i>Nombre de grilles par assemblage</i></p> <p><i>Composition des grilles</i></p> <p><i>Nombre de tubes guides par assemblage</i></p> <p><i>Composition des tubes guides</i></p> <p><i>Diamètre des tubes guides, partie supérieure (mm)</i></p>	<p>241</p> <p>17x17</p> <p>265</p> <p>12,6</p> <p>214x214</p> <p>□</p> <p>11</p> <p>□</p> <p>24</p> <p>□</p> <p>11,25 intérieur 12,45 extérieur</p>

5. Les dimensions à froid correspondent aux dimensions aux conditions normales de température et de pression.

- Crayons de combustible (dimensions à froid ⁵) :

<i>Nombre</i>	63865
<i>Diamètre extérieur (mm)</i>	9,50
<i>Jeu diamétral pastille-gaine (mm)</i>	0,17
<i>Épaisseur de la gaine (mm)</i>	0,57
<i>Matériau de la gaine</i>	□

DESCRIPTION DU CŒUR DU RÉACTEUR (SUITE)

- Pastille de combustible (dimensions à froid⁵) :

Matériau	UO2
Densité de l'UO2 (% de la densité théorique)	96
Diamètre (mm)	8,19
Densité théorique de l'UO2 (g/cm ³)	10,96
Enrichissements du combustible pour les assemblages UO2 (% en masse) :	
Zone 1 de cycle <input type="checkbox"/>	1,4%
Zone 2 de cycle <input type="checkbox"/>	2,3%
Zone 3 de cycle <input type="checkbox"/>	3,2%
Assemblages neufs pour les autres cycles de la gestion	4,2%
Poison consommable intégré au combustible	
Matériau	Gd2 O3
Enrichissement du gadolinium (% en masse)	<input type="checkbox"/>
Enrichissement en vecteur d'UO2 (% U235 en masse)	
- dans les assemblages enrichis à 1,4%	-
- dans les assemblages enrichis à 2,3%	1,3
- dans les assemblages enrichis à 3,2%	1,3
- dans les assemblages enrichis à 4,2%	<input type="checkbox"/>

DESCRIPTION DU CŒUR DU RÉACTEUR (SUITE)

- Grappes noires de crayons absorbants (dimensions à froid⁵) :

Absorbant

(1) partie AIC (partie inférieure)

Composition (% en masse) :

- Ag
- In
- Cd

Densité (g/cm³)

Longueur (mm)

Diamètre extérieur de l'absorbant (mm)

- de 0 à [] mm (partie inférieure)
- de [] à [] mm (partie supérieure)

(2) partie B4C (partie supérieure)

Composition : bore naturel (19,9 atomes de B10 pour cent)

Densité (g/cm³)

Diamètre de l'absorbant (mm)

Longueur (mm)

Gainage (dimensions à froid⁵) :

- Diamètre extérieur (mm)
- Diamètre intérieur (mm)
- Épaisseur (mm)
- Matériau

Matériau des bouchons des extrémités inférieure et supérieure

Distance entre le bas de la hauteur active et le bas de la colonne absorbante

Barres totalement insérées (mm)

Barres totalement retirées (mm)

Nombre de grappes (dont grappes d'arrêt)

Nombre de crayons absorbants par grappe

[]

[]

[]

[]

[]

[]

Acier inoxydable

Acier inoxydable

[]

81 (53)

24

DESCRIPTION DU CŒUR DU RÉACTEUR (SUITE)

- Grappes grises de crayons absorbants :

Absorbant AIC

Composition (% en masse) :

- Ag
- In
- Cd

Densité (g/cm³)

Longueur (mm)

Diamètre extérieur de l'absorbant (mm)

- de 0 à 500 mm (partie inférieure)
- de 500 à 4240 mm (partie supérieure)

Crayon inerte

- Diamètre extérieur (mm)
- Diamètre intérieur (mm)
- Longueur (mm)
- Matériau

Gainage (dimensions à froid⁵) :

- Diamètre extérieur (mm)
- Diamètre intérieur (mm)
- Longueur (mm)
- Matériau

Matériau des bouchons des extrémités inférieure et supérieure

Distance entre le bas de la hauteur active et le bas de la colonne absorbante :

Barres totalement insérées (mm)

Barres totalement retirées (mm)

Nombre de grappes

Nombre de crayons absorbants par grappe

Nombre de crayons inertes par grappe

□

□

□
Acier inoxydable

□
Acier inoxydable

Acier inoxydable

□

8

□

□

TAB-4.3.3 PARAMÈTRES DE CONCEPTION NUCLÉAIRE
(COEFFICIENTS DE RÉACTIVITÉ)

□

TAB-4.3.4 CYCLE [] – RÉSUMÉ DES RÉSULTATS NEUTRONIQUES

[]



RAPPORT DE SURETE

— DE FLAMANVILLE 3 —

Version Publique

Edition DEMANDE DE MISE EN SERVICE

CHAPITRE 4

SECTION 3

PAGE 38/71

CENTRALES NUCLÉAIRES

Palier EPR

TAB-4.3.5 CYCLE 1 – RÉSUMÉ DES RÉSULTATS
NEUTRONIQUES

1

TAB-4.3.6 RÉSULTATS SYNTHÉTIQUES POUR TOUS LES CYCLES DE LA PREMIÈRE GESTION

□



RAPPORT DE SURETE

— DE FLAMANVILLE 3 —

Version Publique

Edition DEMANDE DE MISE EN SERVICE

CHAPITRE 4

SECTION 3

PAGE 40/71

CENTRALES NUCLÉAIRES

Palier EPR

**TAB-4.3.7 MARGE D'ARRÊT DANS LES CONDITIONS DE
PUISSANCE NULLE A CHAUD**

□



RAPPORT DE SURETE

— DE FLAMANVILLE 3 —

Version Publique

Edition DEMANDE DE MISE EN SERVICE

CHAPITRE 4

SECTION 3

PAGE 41/71

CENTRALES NUCLÉAIRES

Palier EPR

**TAB-4.3.8 MARGE D'ARRÊT DANS LES CONDITIONS DE
REFROIDISSEMENT PARTIEL**

□



RAPPORT DE SURETE

— DE FLAMANVILLE 3 —

Version Publique

Edition DEMANDE DE MISE EN SERVICE

CHAPITRE 4

SECTION 3

PAGE 42/71

CENTRALES NUCLÉAIRES

Palier EPR

**TAB-4.3.9 SOUS-CRITICITÉ DES ENTREPOSAGES
D'ASSEMBLAGES COMBUSTIBLES DANS LE BÂTIMENT
COMBUSTIBLE (ENTREPOSAGE SOUS EAU)**

□



RAPPORT DE SURETE

— DE FLAMANVILLE 3 —

Version Publique

Edition DEMANDE DE MISE EN SERVICE

CHAPITRE 4

SECTION 3

PAGE 43/71

CENTRALES NUCLÉAIRES

Palier EPR

**TAB-4.3.10 NIVEAUX TYPIQUES DE FLUX DE NEUTRONS
(N/CM²-S) A PLEINE PUISSANCE**

□

**TAB-4.3.11 VALEURS TYPIQUES D'ÉCHAUFFEMENT
GAMMA DANS LE RÉFLECTEUR LOURD**

□

**TAB-4.3.12 VALEURS NOMINALES □ DE FACTEURS
D'INCERTITUDES TECHNOLOGIQUES POUR LES CYCLES
□ DE LA GESTION EPR FA3**

□

**FIG-4.3.1 LOCALISATION DES CRAYONS ABSORBANTS POUR
LES GRAPPES NOIRES**

**FIG-4.3.2 LOCALISATION DES CRAYONS ABSORBANTS POUR
LES GRAPPES GRISES**

FIG-4.3.3 LOCALISATION DES CRAYONS GADOLINIUM PAR ASSEMBLAGE

□

**FIG-4.3.4 ENCHAINEMENT DES CYCLES DE LA PREMIÈRE
GESTION**

□

FIG-4.3.5 SCHÉMA DE CHARGEMENT DU CYCLE □□

FIG-4.3.6 SCHÉMA DE RECHARGEMENT DU CYCLE □

□



RAPPORT DE SURETE

— DE FLAMANVILLE 3 —

Version Publique

Edition DEMANDE DE MISE EN SERVICE

CHAPITRE 4

SECTION 3

PAGE 52/71

CENTRALES NUCLÉAIRES

Palier EPR

FIG-4.3.7 DISTRIBUTION RADIALE DE PUISSANCE ET DE BURN-UP : CYCLE [] – BURN-UP DE 150 MW J/T

[]

[]

FIG-4.3.8 DISTRIBUTION RADIALE DE PUISSANCE ET DE BURN-UP : CYCLE □ – FIN DE VIE NATURELLE

□



RAPPORT DE SURETE
— DE FLAMANVILLE 3 —

CHAPITRE 4

CENTRALES NUCLÉAIRES

Version Publique

SECTION 3

Palier EPR

Edition DEMANDE DE MISE EN SERVICE

PAGE 54/71

FIG-4.3.9 DISTRIBUTION RADIALE DE PUISSANCE ET DE BURN-UP : CYCLE [] – FIN DE STRETCH

[]

FIG-4.3.10 DISTRIBUTION RADIALE DE PUISSANCE ET DE BURN-UP : CYCLE [] – BURN-UP DE 150 MWJ/T

[]

[]

FIG-4.3.11 DISTRIBUTION RADIALE DE PUISSANCE ET DE BURN-UP : CYCLE □ – FIN DE VIE NATURELLE□

FIG-4.3.12 DISTRIBUTION RADIALE DE PUISSANCE ET DE BURN-UP : CYCLE 1 – FIN DE STRETCH

1

FIG–4.3.13 DISTRIBUTION DE PUISSANCE PAR CRAYON DANS UN ASSEMBLAGE TYPIQUE, À UN BURN-UP DE 150 MW J/T, PLEINE PUISSANCE À CHAUD, XÉNON À L'ÉQUILIBRE DU CYCLE □

□□

FIG-4.3.14 DISTRIBUTION DE PUISSANCE PAR CRAYON DANS UN ASSEMBLAGE TYPIQUE, EN FIN DE VIE NATURELLE, PLEINE PUISSANCE À CHAUD, XÉNON À L'ÉQUILIBRE DU CYCLE □

□□

FIG-4.3.15 DISTRIBUTION DE PUISSANCE PAR CRAYON DANS UN ASSEMBLAGE TYPIQUE, A UN BURN-UP DE 150 MWJ/T, PLEINE PUISSANCE À CHAUD, XÉNON À L'ÉQUILIBRE DU CYCLE D'ÉQUILIBRE □

□

□

**FIG-4.3.16 DISTRIBUTION DE PUISSANCE PAR CRAYON DANS UN
ASSEMBLAGE TYPIQUE EN FIN DE VIE NATURELLE, PLEINE
PUISSANCE A CHAUD, XÉNON À L'ÉQUILIBRE DU CYCLE
D'ÉQUILIBRE**

□

□

**FIG-4.3.17 DISTRIBUTION AXIALE DE PUISSANCE MOYENNE
CŒUR, XÉNON A L'ÉQUILIBRE, A UN BURN-UP DE 150 MW J/T DU
CYCLE 1**

1

**FIG-4.3.18 DISTRIBUTION AXIALE DE PUISSANCE MOYENNE
CŒUR, XÉNON A L'ÉQUILIBRE, EN FIN DE VIE NATURELLE DU
CYCLE** □

□

**FIG-4.3.19 DISTRIBUTION AXIALE DE PUISSANCE MOYENNE
CŒUR, XÉNON A L'ÉQUILIBRE, A UN BURN-UP DE 150 MW J/T DU
CYCLE D'ÉQUILIBRE** 



**FIG-4.3.20 DISTRIBUTION AXIALE DE PUISSANCE MOYENNE
CŒUR, XÉNON A L'ÉQUILIBRE, EN FIN DE VIE NATURELLE DU
CYCLE D'ÉQUILIBRE** □

□

**FIG-4.3.21 COEFFICIENT DOPPLER EN FONCTION DE LA
TEMPÉRATURE EFFECTIVE POUR LE CYCLE** □

□

□

FIG-4.3.22 COEFFICIENT DOPPLER EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE EFFECTIVE POUR LE CYCLE D'ÉQUILIBRE □

□

□

FIG-4.3.23 SCHÉMA DE GRAPPE – SÉQUENCE N°1

□

FIG-4.3.24 SCHÉMA DE GRAPPE – SÉQUENCE N°2

□

**FIG-4.3.25 CONFIGURATIONS D'ASSEMBLAGES PÉNALISANTS
POUR LES CALCULS DE SOUS-CRITICITÉ DES ENTREPOSAGES
D'ASSEMBLAGES COMBUSTIBLES DANS LE BÂTIMENT
COMBUSTIBLE**

□



RAPPORT DE SURETE

— DE FLAMANVILLE 3 —

Version Publique

Edition DEMANDE DE MISE EN SERVICE

CHAPITRE 4

SECTION 3

PAGE 71/71

CENTRALES NUCLÉAIRES

Palier EPR

**FIG-4.3.26 PUISSANCE RÉSIDUELLE, DÉSINTÉGRATION DES
PRODUITS DE FISSION ET DES ACTINIDES**

□

□

SOMMAIRE

.4.4	CONCEPTION THERMO-HYDRAULIQUE DU CŒUR	6
0.	EXIGENCES DE SÛRETÉ	6
0.1.	FONCTIONS DE SÛRETÉ	6
0.2.	CRITÈRES FONCTIONNELS	6
0.2.1.	CONTRÔLE DE LA RÉACTIVITÉ DU CŒUR	6
0.2.2.	ÉVACUATION DE LA CHALEUR PRODUITE DANS LE COMBUSTIBLE	6
0.2.3.	CONFINEMENT DES PRODUITS RADIOACTIFS	6
0.3.	EXIGENCES DE CONCEPTION	6
0.4.	ESSAIS ET VÉRIFICATIONS	6
0.4.1.	ESSAIS PRÉLIMINAIRES	6
0.4.2.	SURVEILLANCE EN SERVICE	6
0.4.3.	ESSAIS PÉRIODIQUES	6
0.4.4.	CONTRÔLE DES COMPOSANTS ET DU COMBUSTIBLE	7
1.	BASE DE CONCEPTION	7
1.1.	PROTECTION CONTRE LA CRISE D'ÉBULLITION	7
1.2.	PROTECTION CONTRE LA FUSION À CŒUR DU COMBUSTIBLE	8
1.3.	STABILITÉ HYDRO-DYNAMIQUE DU CŒUR	8
1.4.	DIMENSIONNEMENT HYDRAULIQUE	9
2.	DONNÉES ET HYPOTHÈSES	11
2.1.	CODE DE RÉFÉRENCE	11
2.1.1.	PRINCIPALES HYPOTHÈSES DE CALCUL	11
2.1.2.	EFFET DE MÉLANGE ENTRE SOUS-CANAU	12
2.1.3.	DISTRIBUTION DE PUISSANCE	12
2.2.	FONCTIONS I&C ET INSTRUMENTATIONS ASSOCIÉES	14
2.2.1.	FONCTIONS BAS RFTC	14
2.2.2.	FONCTIONS PUISSANCE LINÉIQUE ÉLEVÉE	15
2.3.	MÉTHODOLOGIE UTILISÉE POUR L'ANALYSE DES ÉVÉNEMENTS	15
2.3.1.		15

2.3.2. □	16
2.4. PARAMÈTRES THERMO-HYDRAULIQUES DE FONCTIONNEMENT	16
2.4.1. PERTES DE CHARGE DANS LA CUVE DU RÉACTEUR	16
2.4.2. DÉBIT DANS LE CŒUR	17
2.4.3. DÉFAUT DE RÉPARTITION DU DÉBIT À L'ENTRÉE DU CŒUR	17
2.4.4. PROGRAMME DE TEMPÉRATURE EN FONCTION DE LA PUISSANCE	17
2.5. CORRÉLATION DE FLUX THERMIQUE CRITIQUE	18
2.5.1. BASE EXPÉRIMENTALE DE LA CORRÉLATION DE FLUX CRITIQUE □	18
2.5.2. FORME DE LA CORRÉLATION DE FLUX CRITIQUE □	18
2.5.3. PARAMÈTRES STATISTIQUES DE LA CORRÉLATION DE FLUX CRITIQUE □	19
2.5.4. LA CORRÉLATION □	19
3. INCERTITUDES	19
3.1. INCERTITUDES AFFECTANT LE RFTC	20
3.1.1. INCERTITUDES RELATIVES AUX PARAMÈTRES PHYSIQUES MESURÉS	20
3.1.2. INCERTITUDE RELATIVE À LA CORRÉLATION DE FLUX CRITIQUE	21
3.1.3. INCERTITUDE RELATIVE AU CODE DE RÉFÉRENCE ET PÉNALITÉ MSG	21
3.1.4. INCERTITUDES RELATIVES AUX ÉTATS TRANSITOIRES	22
3.1.5. INCERTITUDES RELATIVES AUX PARAMÈTRES DE FABRICATION	22
3.1.6. INCERTITUDES RELATIVES AU FLÉCHISSEMENT DES CRAYONS DANS LE RÉACTEUR	23
3.1.7. INCERTITUDES RELATIVES À L'ALGORITHME SIMPLIFIÉ DE CALCUL DU RFTC	24
3.1.8. INCERTITUDES RELATIVES À L'ERREUR DE REPRÉSENTATIVITÉ DES COLLECTRONS (TRACKING ERROR)	24
3.1.9. INCERTITUDES RELATIVES AU DÉBIT ABSOLU ET AU BY-PASS CŒUR	26

3.1.10. INCERTITUDES RELATIVES À LA DISTRIBUTION DE PUISSANCE	27
3.1.11. INCERTITUDE RELATIVE AUX FLUCTUATIONS DE FLUX NEUTRONIQUE	27
3.2. INCERTITUDES AFFECTANT LA PUISSANCE LINÉIQUE	27
3.2.1. INCERTITUDES RELATIVES AUX PARAMÈTRES PHYSIQUES MESURÉS	27
3.2.2. INCERTITUDES RELATIVES AUX PARAMÈTRES DE FABRICATION	28
3.2.3. INCERTITUDES RELATIVES AU FLÉCHISSEMENT DES CRAYONS DANS LE RÉACTEUR	28
3.2.4. INCERTITUDES RELATIVES À L'ERREUR DE REPRÉSENTATIVITÉ DES COLLECTRONS (TRACKING ERROR)	28
3.2.5. INCERTITUDE RELATIVE AUX FLUCTUATIONS DE FLUX NEUTRONIQUE	30
4. SEUILS ET CRITÈRES	31
4.1. SEUILS ET CRITÈRES EN RFTC	31
4.1.1. SEUIL DE SURVEILLANCE DNB_{LCO}	31
4.1.2. SEUILS DE PROTECTION DNB_{RT} , $DNB_{RT\ IMB/RD}$, $DNB_{RT\ RD}$, $DNB_{RT\ IL}$	31
4.1.3. CRITÈRE DE CONCEPTION $DNBR_{DESIGN\ LIMIT}$	31
4.1.4. SEUIL DNB_{SAL}	31
4.2. SEUILS EN PUISSANCE LINÉIQUE	32
4.2.1. SEUIL DE SURVEILLANCE $HLPD_{LCO}$	32
4.2.2. SEUILS DE PROTECTION $HLPD_{RT}$ ET $PCI_{RT\ RD}$	32
LISTE DES RÉFÉRENCES.	33

TABLEAUX :

TAB-4.4.1 PARAMÈTRES DE CONCEPTION THERMO- HYDRAULIQUE	34
TAB-4.4.2 DÉBIT DE CONTOURNEMENT DU CŒUR ET PERTES DE CHARGE DANS LA CUVE ET DANS LE CŒUR.....	36
TAB-4.4.3 INCERTITUDES RELATIVES AU RFTC	37
TAB-4.4.4 BASE UTILISÉE POUR AJUSTER L'ALGORITHME DE CALCUL DU RFTC SUR LE CODE DE RÉFÉRENCE []	38
TAB-4.4.5 CARACTÉRISATION DE L'ÉCART EN RFTC ENTRE [] ET L'ALGORITHME	39
TAB-4.4.6 STATEPOINTS UTILISÉS POUR ÉTABLIR LES SEUILS EN RFTC (MSG).....	40
TAB-4.4.7 TRACKING ERROR ET SEUILS DE SURVEILLANCE EN RFTC	44
TAB-4.4.8 TRACKING ERROR, INCERTITUDES FFN ET SEUILS DE PROTECTION EN RFTC	45
TAB-4.4.9 INCERTITUDES RELATIVES À LA PUISSANCE LINÉIQUE	47
TAB-4.4.10 TRACKING ERROR, INCERTITUDES FFN ET SEUILS DE SURVEILLANCE EN PUISSANCE LINÉIQUE.....	48
TAB-4.4.11 TRACKING ERROR, INCERTITUDES FFN ET SEUILS DE PROTECTION EN PUISSANCE LINÉIQUE.....	49

FIGURES :

FIG-4.4.1 TAUX DE VIDE EN FONCTION DU TITRE THERMO- DYNAMIQUE	51
FIG-4.4.2 APPROCHE GLOBALE D'ANALYSE DES ÉVÉNEMENTS PCC VIS- À-VIS DU RFTC	52
FIG-4.4.3 POSITIONS RADIALES ET AXIALES DES COLLECTRONS.....	53
FIG-4.4.4 POSITIONS AXIALES DES COLLECTRONS DANS UN ASSEMBLAGE []	54
FIG-4.4.5 POSITIONS DE L'AMS DANS LE CŒUR	55
FIG-4.4.6 PROGRAMME DE TEMPÉRATURE (AU DÉBIT THERMO- HYDRAULIQUE).....	56



RAPPORT DE SURETE

— DE FLAMANVILLE 3 —

Version Publique

Edition DEMANDE DE MISE EN SERVICE

CHAPITRE 4

SECTION 4

PAGE 5/59

CENTRALES NUCLÉAIRES

Palier EPR

**FIG–4.4.7 MODÈLE DE FLÉCHISSEMENT DU CRAYON - FERMETURE DU
CANAL EN FONCTION DE L'ÉPUISEMENT DU COMBUSTIBLE 58**

**FIG–4.4.8 PÉNALITÉ RFTC EN FONCTION DE LA FERMETURE DU CANAL
(MODÈLE NRC 1979) 59**

.4.4 CONCEPTION THERMO-HYDRAULIQUE DU CŒUR

0. EXIGENCES DE SÛRETÉ

0.1. FONCTIONS DE SÛRETÉ

Les fonctions de sûreté garanties par la conception thermohydraulique sont les suivantes :

- évacuation par l'intermédiaire du fluide réfrigérant de la chaleur produite dans le combustible ;
- confinement des substances radioactives (actinides et produits de fission) à l'intérieur de la première barrière de confinement.

0.2. CRITÈRES FONCTIONNELS

0.2.1. Contrôle de la réactivité du cœur

Aucune répercussion sur la conception thermohydraulique.

0.2.2. Évacuation de la chaleur produite dans le combustible

La conception thermohydraulique vise à garantir l'évacuation de la chaleur produite dans le cœur grâce au maintien d'un transfert efficace entre les crayons de combustible et le réfrigérant dans les conditions normales de fonctionnement et en cas de transitoire de catégorie PCC-2.

0.2.3. Confinement des produits radioactifs

L'absence de crise d'ébullition garantit l'intégrité de la gaine des crayons combustible (première barrière).

0.3. EXIGENCES DE CONCEPTION

La conception thermohydraulique n'est pas soumise à des exigences de conception spécifiques.

0.4. ESSAIS ET VÉRIFICATIONS

0.4.1. Essais préliminaires

Les hypothèses de base des scénarios choisis pour les analyses de sûreté doivent être contrôlées lors des premiers essais physiques du cœur. Certains de ces essais, par exemple les mesures du débit du réfrigérant primaire ou du temps de chute des grappes de commande, sont effectués régulièrement. D'autres essais ne sont réalisés en totalité qu'à la mise en service d'une tête de série.

Pour les unités suivantes, seuls doivent être effectués les essais nécessaires pour garantir que les caractéristiques thermohydrauliques du cœur sont identiques à celles du cœur de la tête de série.

0.4.2. Surveillance en service

Le débit du réfrigérant primaire du réacteur et le temps de chute des barres de commande doivent être mesurés régulièrement.

0.4.3. Essais périodiques

Sans objet.

0.4.4. Contrôle des composants et du combustible

Des contrôles sont réalisés sur le combustible après fabrication. Des mesures de fabrication d'une importance critique pour les analyses thermohydrauliques sont effectuées pour vérifier que les facteurs d'incertitude technologique du canal chaud des analyses de conception sont respectés.

1. BASE DE CONCEPTION

La conception thermohydraulique du cœur du réacteur vise principalement à garantir un transfert de chaleur et une répartition de la production de chaleur dans le cœur, tels que l'évacuation de la chaleur par le circuit primaire ou le circuit d'injection de sécurité (selon le cas) assure le respect des exigences de sûreté présentées au paragraphe 0 du sous-chapitre 4.3.

Pour répondre à ces critères, les bases de conception suivantes ont été établies pour la conception thermohydraulique du cœur du réacteur.

1.1. PROTECTION CONTRE LA CRISE D'ÉBULLITION

La conception thermohydraulique est telle que la probabilité de non-apparition d'une crise d'ébullition pendant le fonctionnement normal et les transitoires (événements PCC1 et PCC2) est au moins égale à 95% avec un niveau de confiance de 95%.

En évitant la crise d'ébullition, on assure un transfert de chaleur suffisant entre la gaine combustible et le fluide primaire, ce qui évite les détériorations de la gaine résultant d'un refroidissement insuffisant. La température maximale de surface de gaine ne peut pas constituer un critère car elle se situe à quelques degrés au-dessus de la température du réfrigérant lors de l'ébullition nucléée.

La marge par rapport au phénomène de la crise d'ébullition est évaluée grâce au Rapport de Flux Thermique Critique (RFTC) qui s'exprime de la manière suivante :

$$RFTC = \frac{\varphi_{critique}}{\varphi_{loc}}$$

où :

φ_{loc} est le flux thermique local réel ;

$\varphi_{critique}$ est le flux thermique critique tel qu'il est prédit par la corrélation considérée.

L'utilisation d'un algorithme de calcul simplifié du RFTC dans le système de protection et dans le système de surveillance permet de respecter le critère de conception en définissant un arrêt automatique du réacteur par bas RFTC (DNB_{RT}) et une condition limite d'exploitation (DNB_{LCO}) associée au RFTC. □

Les valeurs calculées en ligne sont élaborées par des systèmes qui utilisent des mesures pour reconstituer les conditions locales au moyen d'un algorithme et appliquent la corrélation de flux thermique critique choisie pour calculer le RFTC.

Les incertitudes relatives à la reconstitution et à la précision des mesures sont prises en compte lors de la définition des points de consigne des systèmes de protection et de surveillance. Les points de consigne sont fixés de telle façon qu'il y ait une probabilité de 95% avec un niveau de confiance de 95% de non-apparition d'une crise d'ébullition critique lorsque la valeur du RFTC calculée sur site est égale au seuil de protection en RFTC.

1.2. PROTECTION CONTRE LA FUSION À CŒUR DU COMBUSTIBLE

La conception thermohydraulique est telle que, en conditions de fonctionnement associées à des événements PCC1 et PCC2, il existe au minimum une probabilité de 95% avec un niveau de confiance de 95% que les crayons combustibles ayant la densité de puissance linéique maximale (W/cm) ne dépassent pas la température de fusion du combustible.

La température de fusion admise de l'UO₂ est de 2810°C pour un élément non irradié.

En évitant la fusion du combustible, on préserve la géométrie de ce dernier et les éventuels effets défavorables du combustible en fusion sur la gaine sont éliminés.

La marge par rapport au phénomène de la fusion à cœur du combustible est évaluée grâce à la mesure de la puissance linéique locale.

Les incertitudes relatives à la reconstitution et à la précision des mesures sont prises en compte lors de la définition des points de consigne des systèmes de protection et de surveillance.

1.3. STABILITÉ HYDRO-DYNAMIQUE DU CŒUR

Les écoulements avec ébullition peuvent être sujets à des instabilités thermo-hydro-dynamiques. Ces instabilités ne sont pas acceptables dans des réacteurs car elles peuvent occasionner une modification des conditions thermohydrauliques qui peut conduire à une réduction du flux thermique critique par rapport à celui qui est observé dans des conditions d'écoulement permanent ou bien à des vibrations indésirables des composants du cœur. En conséquence, un critère de conception thermohydraulique a été élaboré, de manière à garantir que les modes de fonctionnement en cas d'événements PCC1 et PCC2 ne conduisent pas à des instabilités thermo-hydro-dynamiques.

Deux types spécifiques d'instabilité de l'écoulement sont pris en compte pour le fonctionnement des REP. Il s'agit d'instabilité permanente de Ledinegg (oscillation de débit) et d'instabilité dynamique avec onde de densité.

L'instabilité de Ledinegg implique une variation brutale du débit d'un régime permanent à un autre. Cette instabilité apparaît lorsque la pente de la courbe perte de charge-débit du circuit primaire ($\partial P/\partial G$ interne) devient inférieure à celle de la courbe perte de charge-débit ($\partial P/\partial G$ externe) d'alimentation de la boucle (hauteur de charge). Le critère de stabilité est donc $\partial P/\partial G$ interne \geq $\partial P/\partial G$ externe.

Le mécanisme d'oscillation de débit dans un canal chauffé peut être décrit comme suit. Brièvement, une fluctuation du débit d'entrée produit une perturbation de l'enthalpie. Ceci perturbe la longueur et la perte de charge de la zone monophasique et entraîne des perturbations de la qualité ou du vide dans la zone diphasique qui remontent le canal avec l'écoulement. Les perturbations de qualité et de longueur de la zone diphasique créent des perturbations de la perte de charge diphasique.

Cependant, comme la perte de charge totale du cœur est maintenue par les caractéristiques du circuit de fluide externe au cœur, il en résulte que la perturbation de la perte de charge diphasique remonte jusqu'à la zone monophasique. Les perturbations qui en découlent peuvent être soit atténuées, soit auto-entretenues.

La courbe de hauteur de charge de l'EPR a une pente négative ($\partial P/\partial G$ externe $<$ 0) tandis que la courbe perte de charge-débit du circuit primaire a une pente positive ($\partial P/\partial G$ interne $>$ 0) sur les plages de fonctionnement PCC1 et PCC2. Le critère de stabilité est satisfait et l'instabilité de Ledinegg n'intervient donc pas.

L'application de la méthode d'Ishii \square aux réacteurs indique qu'il existe une large marge vis-à-vis d'une instabilité des ondes de densité ; il faudrait, par exemple, des augmentations de l'ordre de 200% de la puissance nominale du réacteur pour voir apparaître le début attendu de ce type d'instabilité.

La méthode d'Ishii appliquée à la centrale EPR est empreinte de conservatisme du fait des canaux ouverts parallèles caractéristiques des cœurs de REP. Pour ce type de cœur, il y a peu de résistance à l'écoulement transverse quittant les canaux de forte puissance. Il existe également un transfert d'énergie des canaux à forte puissance vers les canaux à faible puissance. Ce couplage avec des canaux plus froids a conduit à l'idée qu'une configuration à canaux ouverts est plus stable que la configuration à canaux fermés analysée ci-dessus dans les mêmes conditions aux limites.

Une preuve supplémentaire que les instabilités de l'écoulement ne nuisent pas à la marge thermique est fournie par les données tirées des essais de flux critique. De nombreux assemblages de crayons ont été soumis aux essais sur de larges plages de conditions de fonctionnement sans montrer de signes d'apparition prématurée de crise d'ébullition et sans présenter de données incohérentes pouvant indiquer des instabilités de débit dans l'assemblage.

En résumé, on peut conclure qu'il ne se produira pas d'instabilités thermo-hydro-dynamiques en fonctionnement PCC1 et PCC2 du réacteur. Il existe une large marge en puissance, supérieure au double de la puissance nominale, avant l'apparition attendue de ce type d'instabilité.

1.4. DIMENSIONNEMENT HYDRAULIQUE

Les cuves des réacteurs EPR et les équipements internes de ces cuves présentent des caractéristiques nouvelles par rapport à celles des modèles antérieurs et ces caractéristiques sont importantes pour le dimensionnement hydraulique. Les évolutions résultent des nouvelles options retenues, de nouvelles exigences ou de la convergence entre les conceptions française et allemande existantes. Les évolutions les plus importantes sont les suivantes :

Équipements internes inférieurs :

- le dispositif de répartition de débit, situé au-dessous de la plaque support du cœur qui assure une répartition relativement uniforme du débit à l'entrée du cœur et empêche la formation de tourbillons à l'intérieur du plénum inférieur. Ce nouvel élément résulte du choix fait dans l'EPR de supprimer les pénétrations en fond de cuve, ce qui laisse le plénum inférieur vide ;
- le réflecteur lourd, composant massif. Il remplace le cloisonnement autour de la cavité du cœur.

Équipements internes supérieurs :

- la conception des tubes guide des barres de commande, et des colonnes entretoises a été modifiée pour être adaptée à la fois à la conception des mécanismes de commande des grappes (inspirée du modèle KONVOI) et aux caractéristiques du cœur et des assemblages combustibles de l'EPR (inspirées des normes françaises).

De plus, d'autres évolutions sont apparues dans la cuve du réacteur par rapport aux modèles actuels : augmentation de la taille du cœur, augmentation du nombre de clés radiales (huit au lieu de six), augmentation de l'espace radial dans la descente annulaire.

En raison de ces évolutions, il est nécessaire de vérifier que les caractéristiques hydrauliques générales de la cuve du réacteur répondent aux objectifs de caractéristiques hydrauliques, c'est-à-dire que la répartition du débit à l'entrée et à la sortie du cœur reste satisfaisante, qu'un mélange suffisant intervient en amont de l'entrée du cœur entre les débits des quatre boucles, que les équipements internes sont suffisamment refroidis, que leur dimensionnement mécanique permet un fonctionnement en sécurité.

L'analyse des résultats d'essais sur les boucles hydrauliques \square en configuration normale d'écoulement (équilibré et déséquilibré) a permis de montrer que les exigences fonctionnelles concernant les distributions de débits en entrée et en sortie cœur (les sur-débits et sous-débits extrêmes mesurés

ainsi que les écarts maximaux de débits entre assemblages voisins) sont respectées. Les résultats font état d'une distribution globalement centrée avec :

- pour l'entrée cœur, une région centrale en sur-débit et une région périphérique en sous-débit, montrant notamment des marges confortables sur le sur-débit maximum,
- pour la sortie cœur, une région centrale en sous-débit et une région en périphérie en sur-débit (en particulier à l'aplomb des branches chaudes, du fait de leur effet d'aspiration).

L'interprétation de ces essais a en outre montré une bonne répétabilité ainsi qu'une bonne stabilité des paramètres normalisés en fonction du nombre de Reynolds, afin de valider la représentativité des phénomènes physiques à échelle réacteur.

De plus, pour appuyer cette extrapolation, des modèles CFD ont été validés sur la base des résultats d'essais (distribution de débits entrée cœur, champs de pression, mélanges hydrauliques etc...) et ont été portés à échelle réacteur (moyennant quelques adaptations, telles que la couche limite et la modélisation du cœur). Ces transpositions ont permis de confirmer :

- la conservation de la phénoménologie d'écoulement par rapport à l'échelle maquette,
- la cohérence des paramètres (d'intérêt) adimensionnés,
- la forte similarité des matrices de mélange entre les deux échelles.

Enfin, ces transpositions ont permis de montrer que :

- la distribution de débits s'aplanit fortement le long du cœur sous l'effet des pertes de charge des différents éléments composant le combustible,
- l'erreur maximale de représentativité de la mesure de température en branches chaudes par le système d'écopes est suffisamment faible pour justifier le bon dimensionnement des écopes (et le mélange thermique de l'écoulement par le plénum supérieur et les branches chaudes).

Ainsi, la validation hydraulique des internes de cuve a été réalisée sur base expérimentale et consolidée par calcul hydraulique 3D à échelle réacteur via des modèles validés à échelle maquette.

Les forces hydrauliques maximales exercées sur les équipements internes de la cuve sont atteintes pour les conditions de débit maximal.

En fonctionnement nominal, les forces hydrauliques sont calculées avec le débit mécanique de conception, en prenant en compte la valeur minimale du débit de contournement du cœur.

Aux conditions d'arrêt à froid, les forces hydrauliques sont calculées avec les mêmes débits (cuve et contournement du cœur) mais en prenant en compte la différence de densité du réfrigérant. Ceci correspond à des valeurs enveloppe pour le fonctionnement normal.

Les conditions d'un événement de survitesse d'une pompe primaire, capable de produire des débits de 20% supérieurs au débit mécanique de conception sont utilisées pour déterminer l'enveloppe des forces hydrauliques dans des conditions transitoires.

Des essais hydrauliques ont été utilisés pour vérifier la valeur des charges hydrauliques en cas de survitesse de la pompe au débit mécanique de calcul, à chaud comme à froid.

Concernant le réflecteur lourd, la vérification du respect des exigences fonctionnelles (en particulier, le *bypass* minimum pour assurer son bon refroidissement et le *bypass* maximum) a été réalisée au moyen de calculs hydrauliques reposant sur l'utilisation :

- des corrélations Idel'cik pour les canaux « simples » (canaux droits, diaphragmes, ...),
- des résultats d'essais sur des maquettes dédiées à l'échelle 1 et dans des configurations représentatives de celles du réacteur.

2. DONNÉES ET HYPOTHÈSES

Les principaux paramètres de fonctionnement de la chaudière sont donnés dans le tableau [TAB-4.4.1](#).

2.1. CODE DE RÉFÉRENCE

Les premiers essais de flux critique ont été réalisés avec un fluide s'écoulant dans des simples tubes chauffants et en configurations annulaires avec une ou deux parois chauffantes. Les résultats de ces essais ont été analysés au moyen de nombreux modèles physiques différents pour décrire le phénomène d'ébullition critique et toutes les corrélations obtenues sont, par nature, fortement empiriques.

Le développement des méthodes d'essai a permis l'utilisation de faisceaux de crayons au lieu de canaux isolés. Les résultats des essais ont montré que des corrélations de flux critique ne pouvaient être fondées sur les conditions moyennes. Il est donc nécessaire de connaître les conditions locales dans les sous-canaux.

Pour déterminer les conditions locales dans les sous-canaux, le code de calcul [C](#) a été développé. Dans ce code, un faisceau de crayons est considéré comme un réseau de sous-canaux, chacun ayant pour surface de passage la surface délimitée par quatre crayons adjacents. Les sous-canaux sont également divisés en mailles axiales qui définissent des volumes de référence. Les conditions locales du fluide dans chaque volume de référence sont calculées par résolution simultanée des équations de masse, d'énergie et de quantité de mouvement. Le flux thermique critique prédit est élaboré au moyen des conditions locales du fluide dans les sous-canaux calculées par le code et des corrélations [C](#).

2.1.1. Principales hypothèses de calcul

[C](#) permet de déterminer la densité du réfrigérant, la vitesse massique, l'enthalpie, le taux de vide, la pression statique et la distribution de RFTC le long des canaux du cœur du réacteur dans toutes les conditions de fonctionnement prévues.

Ce code possède des modèles de matrices réalistes élaborés pour rendre compte des effets hydrauliques et nucléaires sur l'élévation d'enthalpie dans le cœur. Le comportement de l'assemblage chaud est déterminé par superposition de la distribution de puissance sur les assemblages et de la répartition du débit d'entrée tout en tenant compte du mélange et de la répartition du débit entre les assemblages. Le débit et l'enthalpie moyens dans l'assemblage le plus chaud sont obtenus par l'analyse assemblage par assemblage dans le cœur entier. La variation locale de la puissance, des caractéristiques de fabrication des crayons combustibles et des pastilles et le mélange à l'intérieur de l'assemblage le plus chaud sont ensuite superposés aux conditions moyennes de l'assemblage le plus chaud pour déterminer les conditions dans le canal chaud.

Le modèle d'écoulement est fondé sur un modèle d'écoulement diphasique (figure [FIG-4.4.1](#)) prenant en compte le déséquilibre thermique de la phase liquide et la différence de vitesses des phases liquide et vapeur. Ce modèle est déduit des équations de masse, de quantité de mouvement et de bilan énergétique pour un écoulement turbulent diphasique. L'équation du bilan d'enthalpie de la phase liquide permet des calculs d'ébullition locale. La fermeture des équations nécessite une modélisation physique permettant de décrire les interactions des phases, le mélange turbulent et les interactions fluide-paroi. Ces relations de fermeture sont les suivantes.

- un modèle de frottement aux parois :

[C](#)
[C](#)
[C](#)

- un modèle de transfert de chaleur :

[C](#)

- un modèle de glissement pour prendre en compte des vitesses différentes pour la phase liquide et pour la phase vapeur :

[C](#)

- un coefficient de recondensation, intervenant dans l'équation de bilan d'énergie sur la phase liquide :
□
- des coefficients de viscosité turbulente et de diffusivité qui sont calculés d'après un modèle algébrique et permettent de décrire les effets du mélange :
□

2.1.2. Effet de mélange entre sous-canaux

Dans un faisceau de crayons, les canaux formés par quatre crayons de combustible adjacents s'ouvrent l'un sur l'autre par l'intermédiaire de l'espace entre deux crayons de combustible voisins. Il existe un écoulement croisé entre les canaux du fait de la différence de pression qui existe entre eux.

L'effet de mélange réduit l'élévation d'enthalpie dans le canal chaud.

Dans l'équation du bilan énergétique du code de calcul, un terme permettant de modéliser l'échange turbulent d'enthalpie entre canaux voisins est pris en compte. Ce terme est proportionnel à la différence d'enthalpie entre les canaux. Dans le facteur de proportionnalité apparaît un coefficient qui est appelé coefficient de mélange turbulent.

La valeur de ce coefficient est déterminée après réalisation d'une série d'essais spécifiques réalisés avec le type de grille envisagé.

En analyse du fonctionnement du réacteur, une valeur faible en regard de celles établies lors des essais est utilisée. □

En amont de la première grille de mélange, une valeur conservative □ est retenue.

Par conservatisme, le facteur de mélange utilisé pour dépouiller les essais de flux critique est plus important que celui des études cœur □

2.1.3. Distribution de puissance

La distribution de puissance dans le cœur, largement déterminée en début de vie par le taux d'enrichissement du combustible, le plan de chargement et le niveau de puissance du cœur, est également fonction de variables telles que l'efficacité et la position des barres de commande et l'usure du combustible. Les distributions radiales d'élévation d'enthalpie dans le cœur, qui sont déterminées au moyen de l'intégrale de la puissance de chaque canal, sont d'une grande importance pour les calculs de RFTC. Ces distributions de puissance sont caractérisées par le facteur nucléaire d'élévation d'enthalpie et par les distributions axiales de flux thermique.

Le facteur nucléaire d'élévation d'enthalpie $F_{\Delta H}^N$ est donné par l'expression suivante :

$$F_{\Delta H}^N = \frac{\text{puissance du crayon chaud}}{\text{puissance moyenne des crayons}} = \frac{\max_{x,y} \int_0^H q(x,y,z) dz}{\frac{1}{N} \sum_{x,y} \int_0^H q(x,y,z) dz} = \frac{\int_0^H q(x_{cc}, y_{cc}, z) dz}{\frac{1}{N} \sum_{x,y} \int_0^H q(x,y,z) dz}$$

Où :

- $q(x,y,z)$ est la puissance nucléaire produite par le crayon de coordonnées x, y et à la cote z ;
- x_{cc}, y_{cc} sont les coordonnées de position du crayon chaud ;
- N est le nombre de crayons combustibles dans le cœur ;
- H est la hauteur active.

La modalité d'utilisation de $F_{\Delta H}^N$ dans les calculs de RFTC est importante.

La position du RFTC minimum dépend du profil axial de puissance et la valeur du RFTC dépend de l'élévation d'enthalpie à ce point. Fondamentalement, la valeur maximale de la puissance intégrée sur les crayons du cœur est utilisée pour identifier le crayon le plus probable pour le RFTC minimum.

On obtient un profil axial de puissance qui, lorsqu'il est normalisé à la valeur de $F_{\Delta H}^N$,

représente le flux thermique axial le long du crayon chaud. Les crayons voisins sont supposés avoir le même profil axial et la distribution des puissances intégrées par crayon (distribution radiale) correspond à une distribution typique dans l'assemblage chaud. De cette manière, les profils axiaux correspondant aux cas pénalisants peuvent être combinés à des distributions radiales correspondant aux cas pénalisants pour les calculs de RFTC de référence.

Il convient de noter à nouveau que $F_{\Delta H}^N$ est une intégrale et est utilisé comme tel dans les calculs de RFTC.

Les flux thermiques locaux sont obtenus en utilisant les distributions de puissance explicites du crayon chaud et des crayons adjacents qui prennent en compte des variations des formes des nappes de puissance sur l'ensemble du cœur.

Le facteur d'élévation d'enthalpie $F_{\Delta H}$ correspond à :

$$F_{\Delta H} = \max_{x,y} \{ P_{\Delta H}(x,y) \}$$

où $P_{\Delta H}(x,y)$ est la distribution radiale de l'élévation d'enthalpie du canal (x, y) :

$$P_{\Delta H}(x,y) = \frac{1}{H} \int_0^H P(x,y,z) dz$$

et $P(x, y, z)$ est la puissance relative dans le canal (x, y) à la cote z.

Pour chaque canal, la puissance relative moyenne est la moyenne des puissances relatives des crayons entourant le canal, pondérée par les périmètres chauffants de la partie des crayons qui se trouve dans le canal considéré.

Les études de conception sont réalisées avec des distributions de puissance calculées au moyen des codes de calcul neutronique.

Pour les analyses des accidents de perte de réfrigérant primaire (APRP), on utilise une valeur $F_{\Delta H}^N$

de conception de découplage (voir tableau 4.3 TAB 1).

Cette valeur prend notamment en compte les incertitudes relatives aux calculs de la distribution de puissance, la pénalité xénon correspondant aux oscillations radiales et azimutales et une provision pour les chargements de combustible.

2.2. FONCTIONS I&C ET INSTRUMENTATIONS ASSOCIÉES

2.2.1. Fonctions bas RFTC

Il existe deux fonctions de contrôle commande associées au RFTC :

- la fonction de protection bas RFTC, qui déclenche l'arrêt automatique du réacteur (AAR),
- la fonction de surveillance du RFTC qui limite les conditions d'exploitation (LCO = Limiting Conditions of Operation).

L'utilisation de l'algorithme de calcul du RFTC dans le ou les systèmes de protection et de surveillance permet de respecter le critère de RFTC en définissant une chaîne d'arrêt automatique du réacteur par bas RFTC et une chaîne de surveillance des RFTC (LCO) utilisant directement la variable reconstituée représentative du phénomène à éviter.

La fonction de protection bas RFTC déclenche un arrêt automatique du réacteur quand le RFTC calculé par le système de protection est inférieur ou égal au seuil de protection par bas RFTC (DNB_{RT}). Par ailleurs, trois autres signaux d'arrêt automatique du réacteur peuvent être générés :

- quand le RFTC calculé par le système de protection est inférieur ou égal au seuil de protection $DNB_{RT\ IMB/RD}$, en concomitance avec un signal d'imbalance (IMB) calculé à partir des mesures collectrons, ou un signal de chute de grappe (RD),
- quand le RFTC calculé par le système de protection est inférieur ou égal au seuil de protection $DNB_{RT\ RD}$, en concomitance avec au moins deux signaux de chute de grappe (RD), ou un signal de Partial Trip issu des chaînes de protection puissance linéique élevée, IPG ou bas RFTC,
- quand le RFTC calculé par le système de protection est inférieur ou égal au seuil de protection $DNB_{RT\ IL}$, en concomitance avec un signal de dépassement d'IL. □.

Ces différents arrêts automatiques du réacteur permettent de respecter les critères techniques d'acceptation relatifs à chaque condition de référence (voir sous-chapitre 15.0).

La fonction de surveillance du RFTC (LCO) assure une marge suffisante au critère RFTC en fonctionnement normal pour faire face à des événements conduisant à une diminution significative du RFTC. Pendant des événements PCC1, la valeur du RFTC doit être maintenue au-dessus du seuil $DNBLCO$ afin que, en cas d'apparition d'un transitoire pour lequel la protection par bas RFTC n'est pas efficace, la crise d'ébullition soit évitée.

L'algorithme de protection et l'algorithme de surveillance concernant le RFTC sont tous deux fondés sur les mêmes principes.

Le calcul du RFTC minimal utilise les paramètres suivants :

- la distribution de puissance du canal chaud: Elle est directement issue de l'instrumentation neutronique interne du cœur (les collectrons dont l'emplacement est illustré dans les figures [FIG-4.4.3](#) et [FIG-4.4.4](#). Les signaux des détecteurs installés à l'intérieur du cœur, calibrés grâce au système de mesure par Aeroball (AMS) (dont l'emplacement est illustré en [FIG-4.4.5](#)) et un bilan enthalpique secondaire, fournissent à la fois la puissance locale et la puissance intégrée le long du canal chaud au moyen d'un développement polynômial.
- la température d'entrée donnée par les sondes de température situées en branche froide,
- la pression donnée par les capteurs de pression primaire situés sur le pressuriseur,
- le débit en relatif dans le cœur donné par les capteurs de vitesse des groupes motopompes primaires (GMPP).

Le flux thermique critique est calculé [\[1\]](#) en utilisant des paramètres thermohydrauliques locaux, à savoir : pression, titre et débit massique.

Ces paramètres sont calculés au moyen d'un modèle simplifié à canal unique représentant le canal chaud sans tenir compte des échanges avec les canaux voisins. C'est pourquoi ce modèle est ajusté sur le code de conception thermohydraulique qui prend en compte les échanges de masse et d'énergie entre canaux (voir [§ 3.1.7.](#)).

2.2.2. Fonctions puissance linéique élevée

Il existe deux fonctions de contrôle commande associées à la puissance linéique :

- la fonction de protection contre les puissances linéiques élevées, qui déclenche l'arrêt automatique du réacteur (AAR),
- la fonction de surveillance des puissances linéiques qui limite les conditions d'exploitation (LCO).

Le respect des critères de sûreté relatifs à la fusion au centre de la pastille de combustible est garanti si l'on satisfait aux critères techniques d'acceptation concernant la puissance linéique au point chaud qui doit rester inférieure à une certaine limite.

Les systèmes de protection et de surveillance permettent de respecter les critères de sûreté concernant la fusion au centre de la pastille de combustible en intégrant une chaîne d'arrêt automatique du réacteur par puissance linéique élevée et une chaîne de surveillance des puissances linéiques élevées prenant directement pour base la reconstitution de la puissance linéique au point chaud issue de l'instrumentation nucléaire fixe interne du cœur constituée de collectrons.

La fonction de protection contre les puissances linéiques élevées déclenche un arrêt automatique du réacteur qui protège le combustible contre la fusion au centre de la pastille de combustible quand la puissance linéique mesurée par le système de protection est supérieure ou égale au seuil de protection par puissance linéique élevée ($HLPD_{RT}$). Par ailleurs, un autre signal d'arrêt automatique du réacteur peut être généré quand la puissance linéique mesurée par le système de protection est supérieure ou égale au seuil de protection $PC_{|RT RD}$ en concomitance avec un signal de chute de grappe (RD).

La fonction de surveillance des puissances linéiques élevées (LCO) assure essentiellement la conformité au critère d'intégrité du cœur en cas d'accident de perte de réfrigérant primaire (APRP) ou d'événements PCC tels que la rupture de l'arbre d'un GMPP et l'éjection d'une grappe.

2.3. MÉTHODOLOGIE UTILISÉE POUR L'ANALYSE DES ÉVÉNEMENTS

Le paragraphe suivant décrit la méthodologie d'analyse des événements PCC sous l'aspect RFTC. L'approche globale est illustrée dans la figure [FIG-4.4.2](#).

Pour établir les seuils d'arrêt automatique du réacteur (AAR) par bas RFTC et des conditions limites d'exploitation (LCO), les événements à analyser sont des transitoires (PCC2) et, également, certains événements PCC3 ou PCC4 (comme la rupture de tuyauterie vapeur).

[\[1\]](#)

2.3.1. [1]

[\[1\]](#)

- [\[1\]](#)

- [\[1\]](#)

2.3.2. []

[]

2.4. PARAMÈTRES THERMO-HYDRAULIQUES DE FONCTIONNEMENT**2.4.1. Pertes de charge dans la cuve du réacteur**

Des pertes de charge sont dues au frottement sur les parois et aux changements de géométrie des parois guidant le fluide. On suppose que l'écoulement est monophasique, turbulent et le fluide incompressible. Ces hypothèses s'appliquent aux calculs des pertes de charge dans le cœur et la cuve réalisés pour déterminer le débit dans le circuit primaire. Les effets diphasiques sont négligés dans l'évaluation des pertes de charge dans la cuve car le taux de vide moyen du cœur est négligeable (le caractère diphasique de l'écoulement est pris en compte dans les analyses thermohydrauliques par sous-canaux du cœur).

[]

En raison de la complexité de la géométrie de l'écoulement dans le cœur et la cuve, on ne dispose pas de valeurs analytiques précises des coefficients de forme et de frottement. Les coefficients de perte de charge des principales singularités de la cuve du réacteur EPR ont été déterminés sur la base d'essais sur boucles hydrauliques :

- pour l'ajutage d'entrée cuve et le plénum inférieur : essais intégraux en configuration d'écoulement (équilibré et légèrement déséquilibré) avec 4 pompes en service []

[]

[]

[]

[]

- pour la Plaque Inférieure de Cœur (PIC) : essais monocanaux [] à échelle 1, représentative du groupe d'entrée cœur EPR (veine amont + PIC + partie basse d'un assemblage combustible) []

[]

[]

- pour la Plaque Supérieure de Cœur (PSC) : essais monocanaux [] à échelle 1, représentative du groupe de sortie cœur EPR (partie haute d'un assemblage combustible + PSC + plénum pouvant contenir un élément du plénum supérieur EPR) []

[]

[]

- pour le plénum supérieur et l'ajutage de sortie cuve : essais intégraux en configuration d'écoulement (équilibré et légèrement déséquilibré) avec 4 pompes en service []

[]

[]

[]

[]

Les coefficients de perte de charge dans le cœur sont déterminés lors d'essais hydrauliques sur des assemblages combustibles avancés 17 x 17. Ces essais sont réalisés dans une boucle d'essai sur une large plage de nombres de Reynolds, y compris ceux que l'on rencontre dans le cœur d'un REP.

Les valeurs des pertes de charge en fonctionnement à puissance nominale sont présentées dans le tableau [TAB-4.4.2](#). Il s'agit des pertes de charge sur l'ensemble de la cuve, ajutages d'entrée et de sortie incluses, et sur l'ensemble du cœur, assemblages combustibles, plaques inférieure et supérieure de cœur inclus. Ces pertes de charge sont élaborées dans les conditions nominales de fonctionnement les plus probables.

Des mesures de débit primaire seront réalisées (voir [§ 0.4.1.](#)) au cours des essais de démarrage de la centrale pour vérifier que les débits utilisés dans la conception, qui sont déterminés en partie sur la base des pertes de charge calculées selon la méthode décrite ici, sont conservatifs.

2.4.2. Débit dans le cœur

Le réfrigérant entre dans la cuve du réacteur par les ajutages d'entrée cuve. Il descend ensuite dans l'espace annulaire formé par la cuve du réacteur et l'enveloppe du cœur et remonte dans le cœur et le plenum supérieur. Il sort de la cuve du réacteur par les ajutages de sortie. Il existe cependant plusieurs chemins de contournement :

- 1) Débit de refroidissement du couvercle de cuve à travers les ajutages percés dans la plaque supérieure.
Ce débit de contournement est constitué d'eau issue de l'espace annulaire de descente. Le fluide est ensuite dirigé du dôme vers le plenum supérieur.
En configuration "dôme chaud" qui est l'option de conception retenue, ce débit est dirigé vers le bas dans certains tubes guides, en fonctionnement normal. Dans d'autres tubes guides, il existe une circulation ascendante.
- 2) Fluide entrant dans les tubes guides des grappes de commande pour refroidir les barres de commande, les crayons de poison (s'ils sont utilisés), les sources et l'instrumentation.
- 3) Débit de fuite partant de l'ajutage d'entrée de la cuve directement vers l'ajutage de sortie de la cuve en passant par l'espace entre la cuve et l'enveloppe de cœur.
- 4) Fluide qui passe entre le réflecteur lourd et l'enveloppe du cœur et à l'intérieur du réflecteur lourd pour refroidir ces composants et qui n'est pas considéré comme disponible pour le refroidissement du cœur.
- 5) Écoulement dans les espaces entre les assemblages combustibles périphériques du cœur et le réflecteur lourd adjacent.

Les différentes contributions ci-dessus sont représentées dans le tableau [TAB-4.4.2](#). □

□ Pour établir cette valeur, des calculs des débits cuve / cœur ont été effectués en utilisant des tolérances dans la direction la plus défavorable et en tenant compte d'incertitudes de pertes de charge.

2.4.3. Défaut de répartition du débit à l'entrée du cœur

Généralement, la répartition du débit à l'entrée n'est pas uniforme. Des études □ en diminuant le débit dans une zone limitée d'entrée du cœur indiquent qu'il se produit un réajustement rapide jusqu'à un tiers de la hauteur du cœur et que, par conséquent, le défaut de répartition du débit à l'entrée a, dans la pratique, un effet négligeable sur le RFTC du canal chaud. Cette redistribution du débit est due au réajustement des vitesses du fluide. En conséquence, le défaut de répartition du débit à l'entrée du cœur n'entraîne pas de pénalités significatives sur la valeur du RFTC et sa localisation ; toutefois, une réduction de 5% du débit entrant dans l'assemblage chaud a été prise en compte dans les calculs □, compensée par une légère suralimentation dans les assemblages périphériques.

2.4.4. Programme de température en fonction de la puissance

La relation entre la température du circuit primaire et la puissance est représentée dans la figure [FIG-4.4.6](#) pour le débit le plus probable, le débit thermohydraulique et le débit mécanique.

2.5. CORRÉLATION DE FLUX THERMIQUE CRITIQUE

2.5.1. Base expérimentale de la corrélation de flux critique

La base expérimentale de la corrélation $\Phi_{critique}$ résulte d'essais d'assemblages combustibles de Framatome $\Phi_{critique}$. Ces essais ayant servi pour la corrélation $\Phi_{critique}$ ont été menés sur des configurations représentatives des assemblages AFA-XL, AFA-2G et AFA-3G.

Les essais sont réalisés dans les conditions suivantes :

- avec répartition uniforme du flux axial,
- avec répartition non uniforme du flux axial,
- avec des cellules typiques,
- avec des cellules à tube guide.

$\Phi_{critique}$

2.5.2. Forme de la corrélation de flux critique

La corrélation $\Phi_{critique}$ est donnée sous forme analytique en fonction :

- de variables thermo-hydrauliques (pression P, débit massique G et titre X),
- de données géométriques du combustible (distances entre les grilles),
- de la longueur chauffée (longueur entre le début de longueur chauffante et l'occurrence du RFTC).

Le flux critique prédit par la corrélation $\Phi_{critique}$ s'exprime sous la forme suivante :

$$\Phi_{CUniforme} = F(\rho, G, X, d_g, g_{sp})$$

$\Phi_{critique}$

où : $\Phi_{critique}$

$\Phi_{critique}$

$\Phi_{critique}$ $\Phi_{critique}$

$\Phi_{critique}$

Les valeurs de flux critique mesuré dans des configurations de flux axial non uniforme peuvent être inférieures, toute chose égale par ailleurs, à celles obtenues avec des formes de flux axial uniforme. Ainsi, les valeurs de flux critique prédit doivent être corrigées. Cette correction est effectuée en appliquant le facteur de Flux Non Uniforme (FNU) de Tong défini comme suit :

$$\Phi_{critique\ prédit}^{flux\ non\ uniforme} = \frac{\Phi_{critique\ prédit}^{flux\ uniforme}}{FNU}$$

Où :

Φ *flux non uniforme
critique prédit*

est le flux corrigé ;

Φ *flux uniforme
critique prédit*

est le flux prédit pour une distribution de flux axial uniforme.

□

□

□

2.5.3. Paramètres statistiques de la corrélation de flux critique □

L'évaluation des caractéristiques de la corrélation de flux critique □ sur la base d'une comparaison avec les résultats d'essais de flux critique conduit à définir la distribution de probabilités du rapport du flux critique mesuré au flux critique prédit (appelé rapport M/P). Le rapport présente une distribution normale.

Dans le cadre de la conception thermohydraulique, des paramètres statistiques conservatifs du rapport M/P sont utilisés. Ces paramètres sont établis en définissant la borne inférieure de l'intervalle de confiance avec un degré de confiance de 95% pour la valeur moyenne et la borne supérieure de l'intervalle de confiance avec un degré de confiance de 95% pour l'écart type. □

□

D'autre part, une limite de conception de la corrélation doit être définie pour les événements de Type III. Cette limite est calculée avec la méthode d'Owen et garantit l'absence de crise d'ébullition avec une probabilité de 95% et un niveau de confiance de 95%. □

□

2.5.4. La corrélation □

La corrélation □ est utilisée en dehors des limites du domaine d'applicabilité de la corrélation □ et en dessous de la première grille de mélange.

□

3. INCERTITUDES

Afin d'anticiper un possible dépassement du critère de conformité sur les distributions radiales de puissance assemblage lors du démarrage, un complément à la justification de sûreté, mené sur le premier cycle (P1-N1), a été réalisé. Un modèle de cœur a été généré pour tenir compte du déséquilibre de puissance attendu en recalant la valeur du coefficient de diffusion du groupe rapide du réflecteur lourd □ (voir sous-chapitre 4.3).

Dans la suite de ce sous-chapitre, les éléments concernant le premier cycle sont calculés sur la base de ce modèle recalé, les éléments concernant les autres cycles sont calculés sur la base du modèle de référence.

3.1. INCERTITUDES AFFECTANT LE RFTC

La détermination des seuils de surveillance et de protection en RFTC est basée sur la méthode statistique généralisée (MSG) [1]. Cette approche utilise une méthode du type Monte-Carlo pour établir les valeurs des seuils en RFTC de manière itérative grâce à de nombreux calculs [2]. La MSG permet de combiner de manière statistique les incertitudes sur les paramètres et sur la corrélation ainsi que des pénalités comptabilisées de manière déterministe.

Les paragraphes suivants décrivent les différentes incertitudes qui affectent le RFTC, détaillent leurs valeurs respectives et précisent si elles sont traitées de manière déterministe ou statistique lors de l'établissement des seuils de surveillance et de protection avec la MSG.

Les paramètres ayant une distribution de probabilité connue et qui sont indépendants les uns des autres sont traités de manière statistique, les autres sont traités de manière déterministe.

Le tableau [TAB-4.4.3](#) récapitule l'ensemble des incertitudes affectant le RFTC.

3.1.1. Incertitudes relatives aux paramètres physiques mesurés

Les paramètres de fonctionnement suivants sont utilisés pour le calcul du RFTC : la température d'entrée, la pression du pressuriseur, le débit primaire relatif et la puissance locale. La température d'entrée est obtenue d'après les indications des sondes de température situées dans la branche froide. La pression du pressuriseur est obtenue d'après les indications des capteurs de pression primaire. Le débit primaire relatif est obtenu d'après les indications des capteurs de vitesse des Groupes MotoPompes Primaires (GMPP) et la distribution de puissance du canal chaud est donnée directement par l'instrumentation neutronique interne du cœur (les collectrons). Chaque processus de mesure est indépendant des autres (sonde de température dans la branche froide, capteur de pression sur le pressuriseur, capteur de vitesse sur le GMPP et collectrons à l'intérieur du cœur). Une incertitude donnée d'une sonde de température due à une erreur d'étalonnage n'a par exemple aucune relation avec celle du capteur du pressuriseur ou avec celle de la vitesse des GMPP.

Certains dispositifs sont intercalés entre le capteur et le signal utilisé dans le système de protection (par exemple pour la température : convertisseur ohms-ampères, convertisseur ampères-volts, module d'isolation si nécessaire et convertisseur analogique/numérique). Tous ces dispositifs ont une incertitude indépendante et aléatoire. Ainsi, les incertitudes relatives aux paramètres physiques mesurés sont traitées de façon statistique dans la MSG.

Les paragraphes suivants détaillent chacun des postes d'incertitude relatifs aux paramètres physiques mesurés.

3.1.1.1. Température d'entrée

La température d'entrée est obtenue d'après les indications des sondes de température situées dans la branche froide. L'incertitude liée à la précision du capteur, au traitement du signal et à son isolation (analogique et numérique) est égale à :

- ΔT °C pour le premier cycle, ΔT °C pour les autres cycles pour le système de surveillance ;
- ΔT °C pour le système de protection (conditions accidentelles représentatives d'un APRP).

Cette incertitude suit une loi normale.

[1]

3.1.1.2. Pression

La pression est obtenue d'après les indications des sondes de pression situées sur le dessus du pressuriseur. L'incertitude liée à la précision du capteur, au traitement du signal et à son isolation (analogique et numérique) est égale à ΔP bar pour le système de surveillance, et ΔP bar pour le système de protection (conditions accidentelles représentatives d'un APRP). Cette incertitude suit une loi normale.

□

3.1.1.3. Débit primaire relatif

Le débit primaire relatif est obtenu d'après les indications des capteurs de vitesse des GMPP. L'incertitude liée à la précision du capteur, au traitement du signal et à son isolation (analogique et numérique) est égale à □%. Cette incertitude suit une loi normale.

L'écart type correspondant vaut □%.

3.1.1.4. Puissance locale

La distribution de puissance du canal chaud est directement issue des mesures de l'instrumentation neutronique interne (les collectrons). L'incertitude globale peut être divisée en plusieurs distributions de probabilités indépendantes :

- L'incertitude sur la précision de la carte de flux reconstruite à partir des mesures AMS (prenant en compte la précision du taux d'activation, la reconstruction de la densité de puissance relative, la discrétisation du taux d'épuisement et le nombre d'assemblages instrumentés). □
- L'incertitude sur la précision des signaux des collectrons (erreur de mesure du courant, évolution de la composition isotopique de l'émetteur du collectron). □

L'incertitude globale sur la puissance locale se décompose ainsi en un biais systématique □ en surveillance et □ en protection et en un écart type égal à □.

L'incertitude sur l'évaluation de la puissance au secondaire par bilan enthalpique, qui est utilisée pour le calibrage des collectrons, vaut □%. L'écart type correspondant, □ vaut □%.

3.1.2. Incertitude relative à la corrélation de flux critique

L'évaluation des caractéristiques de la corrélation de flux critique □ sur la base d'une comparaison avec les résultats d'essais de flux critique a conduit à définir la distribution de probabilités du rapport du flux critique mesuré au flux critique prédit. Ce rapport présente une distribution normale. L'incertitude de la corrélation de flux critique est indépendante des autres incertitudes (paramètres physiques mesurés, tolérances de fabrications,...). Ainsi, elle est traitée de manière statistique dans la MSG.

□

Les seuils « site » de surveillance et de protection en RFTC sont déterminés sur la base de l'écart type associé aux débits massiques élevés □.

3.1.3. Incertitude relative au code de référence et pénalité MSG

Le code de conception □ est utilisé d'une part pour l'analyse des essais de flux thermique critique visant à déterminer les caractéristiques de la corrélation, et d'autre part pour l'évaluation du RFTC lors de l'analyse du fonctionnement du réacteur. Ainsi, l'incertitude relative à la corrélation de flux critique inclut l'incertitude sur le code de conception.

Toutefois, l'incertitude du code de conception □ constitue une source potentielle de dépendance entre l'incertitude de corrélation et l'incertitude sur le RFTC liée aux incertitudes de mesures des paramètres de fonctionnement. Pour tenir compte de cette dépendance potentielle, une pénalité □ est appliquée.

Cette pénalité (appelée « pénalité MSG » par la suite) est traitée de manière déterministe dans l'établissement des seuils de surveillance et de protection avec la MSG.

3.1.4. Incertitudes relatives aux états transitoires

Cette incertitude rend compte de toute discordance introduite par le calcul du RFTC en régime permanent utilisant les propriétés locales du fluide tirées d'analyses en régime transitoire. Elle est indépendante des incertitudes notées ci-dessus. L'écart type associé vaut \pm % de RFTC.

3.1.5. Incertitudes relatives aux paramètres de fabrication

Ces incertitudes prennent en compte les variations de la fabrication en termes de matériau et de géométrie des crayons et assemblages combustibles.

Il existe deux types d'incertitudes de fabrication :

- l'effet du décentrement des pastilles et de l'ovalisation de la gaine sur le flux thermique critique,
- l'effet des tolérances de fabrication de la grille sur le flux thermique critique.

Ces incertitudes présentent un caractère aléatoire car la pénalité qu'elles induisent peut se situer n'importe où dans le cœur et, par conséquent, la conjonction au même endroit de la pénalité due à la tolérance de fabrication et des conditions thermohydrauliques locales défavorables au RFTC constitue un événement aléatoire.

1) Effet du décentrement des pastilles et de l'ovalisation de la gaine sur le flux thermique critique

Certaines pastilles peuvent être décentrées par rapport à la gaine en début de vie. La gaine peut s'ovaliser avec le temps. Dans ces deux cas, il se produit une variation azimutale du flux sur une petite distance axiale.

Dans le cas d'une pastille décentrée, le pic local du flux, sous un angle donné, se prolonge axialement sur une distance correspondant au maximum à quelques longueurs de pastilles en raison du contact aléatoire entre les pastilles et la gaine en début de vie. Ce caractère aléatoire de l'angle de contact est causé par des variations de la forme des extrémités des pastilles et par des variations du diamètre de ces dernières.

Dans le cas d'une gaine ovalisée, le pic local du flux, sous un angle donné, se prolonge axialement sur une distance correspondant au maximum à quelques longueurs de pastilles, compte tenu de la distribution azimutale aléatoire des fragments de la pastille fissurée.

Les incertitudes relatives au canal chaud tiennent compte du fait que la géométrie et les matériaux du crayon et de l'assemblage combustible ne sont pas parfaits.

On distingue les incertitudes suivantes en ce qui concerne le canal chaud.

- Facteur technologique de point chaud :

$$F_Q^E$$

Cette incertitude est utilisée pour évaluer le pic de puissance local maximal (le point chaud) et elle est déterminée par combinaison statistique des tolérances relatives au diamètre, à la densité et au taux d'enrichissement de la pastille.

La valeur relative au combustible AFA3G-LE qui sera utilisé pour la première gestion FA3 est égale à \pm pour le premier cycle, et \pm pour les autres cycles.

Néanmoins, des essais de RFTC avec des pics locaux de flux thermique sur 360° et sur 15 cm de longueur, ont montré qu'il n'est pas nécessaire de prendre en compte une incertitude particulière concernant le flux local.

Comme 15 cm correspondent à une hauteur d'environ 10 pastilles, on considère que les tolérances de diamètre, de densité et de taux d'enrichissement affectant la puissance thermique en un point n'entraînent pas de diminution du RFTC.

Il en résulte qu'il n'est pas nécessaire de prendre en compte une incertitude particulière en matière de pic de flux.

- Facteur d'incertitude technologique de canal chaud :

$$F_{\Delta H}^E$$

Le facteur d'incertitude technologique de canal chaud rend compte des variations de fabrication qui affectent l'élévation d'enthalpie le long du canal. Il est déterminé par combinaison statistique des effets sur l'élévation d'enthalpie de tolérances de fabrication relatives à la densité du combustible, au taux d'enrichissement du combustible et à la position des crayons. L'incertitude résultante est indépendante des autres postes d'incertitudes. Ainsi, elle est traitée de manière statistique dans la MSG.

La valeur relative au combustible AFA3G-LE qui sera utilisé pour la première gestion FA3 est égale à \square pour le premier cycle, et \square pour les autres cycles. L'écart-type correspondant est égal à $\square\%$ pour le premier cycle, et $\square\%$ pour les autres cycles.

On vérifie que, pour chaque recharge fournie de combustible, la valeur correspondante est inférieure à cette valeur de découplage.

2) Effet des tolérances de fabrication de la grille sur le flux thermique critique :

$$F_{LC}^E$$

Cette incertitude représente directement l'effet des tolérances de fabrication de la grille sur les valeurs du RFTC et, plus précisément, l'effet des tolérances relatives au coefficient de pertes de charges singulières de la grille sur la redistribution du débit dans le cœur.

Pour des assemblages combustibles de même modèle, l'effet de la dispersion des valeurs du RFTC est négligeable.

3.1.6. Incertitudes relatives au fléchissement des crayons dans le réacteur

Le RFTC peut être influencé par le phénomène de fléchissement des crayons qui a été détecté à l'examen d'assemblages irradiés. Ce phénomène consiste en un déplacement du crayon par rapport à sa position nominale dans un canal. Il dépend fortement du combustible et la méthodologie décrite ci-dessous est tirée de l'expérience française.

La modification de l'écoulement due au fléchissement des crayons induit une réduction du flux critique thermique.

La pénalité qui en résulte est quantifiée par une convolution de deux modèles :

- une loi enveloppe définissant l'ordre de grandeur du fléchissement des crayons, c'est-à-dire de la fermeture du canal, en fonction de l'épuisement du combustible, sur la base de mesures du fléchissement des crayons des assemblages combustibles irradiés. La loi enveloppe est présentée dans la figure [FIG-4.4.7](#),
- une loi définissant la pénalité RFTC en fonction de la fermeture du canal. La loi de pénalité utilisée est celle agréée par la NRC en 1979. Elle est donnée dans la figure [FIG-4.4.8](#) et conduit à différencier le fonctionnement à plein débit du fonctionnement à débit réduit.

Le modèle résultant donne la pénalité RFTC en fonction de l'épuisement du combustible.

L'expérience de Framatome en matière de combustible permet de considérer que la pénalité de fléchissement (PF) est nulle au-dessous d'une valeur d'épuisement de 16000 MWj/t. Au-dessus de cette limite d'épuisement, la pénalité augmente linéairement mais peut être limitée lorsque l'épuisement des crayons augmente. Après analyse de la diminution de $F_{\Delta H}$ avec l'épuisement dans la première gestion FA3, la limite d'épuisement qui est prise en compte pour évaluer le facteur de pénalité dû au fléchissement des crayons est 28000 MWj/t. Cette limite tient compte d'une marge de près de 5000 MWj/t.

A cette valeur correspondent les pénalités de fléchissement suivantes :

- PF = 0% de RFTC pour l'analyse d'un événement à plein débit,
- PF = 0% de RFTC pour l'analyse d'un événement avec perte de débit du fait que, si 3 boucles sur 4 fonctionnent ou s'il y a un événement de perte de débit, la pénalité est légèrement supérieure. 0

L'incertitude liée au fléchissement des crayons est traitée de manière déterministe dans la MSG pour établir les seuils de protection et de surveillance en RFTC. De manière conservatrice, la pénalité à débit réduit est prise en compte pour établir les seuils de protection et de surveillance en RFTC.

3.1.7. Incertitudes relatives à l'algorithme simplifié de calcul du RFTC

Le RFTC est calculé dans les chaînes de surveillance et de protection en utilisant les paramètres physiques mesurés rappelés au § 3.1.1. et un modèle monocanal représentant le canal chaud sans les échanges avec les canaux voisins. Cet algorithme est ajusté sur le code de conception 0 à l'aide de facteurs correctifs sur le titre de sortie et sur la vitesse massique locale appelés « bias curves ».

Cet ajustement se base sur une comparaison entre les résultats du code de conception 0 et le calcul de l'algorithme de calcul du RFTC pour de nombreux calculs de RFTC (plus de 19000 cas) couvrant le domaine de fonctionnement PCC1 et PCC2 (voir tableau TAB-4.4.4).

L'ajustement est réalisé de façon à avoir la borne inférieure de l'intervalle de confiance à 95% de l'écart en RFTC entre 0 et l'algorithme supérieure à zéro. Ceci garantit que le calcul du RFTC par l'algorithme est plus pénalisant que 0 avec un niveau de confiance de 95%. Le tableau TAB-4.4.5 fournit le nombre de cas étudiés, la valeur moyenne, l'écart-type et la borne inférieure de l'intervalle de confiance à 95% de l'écart en RFTC pour les systèmes de protection et de surveillance.

Étant donné que le calcul du RFTC par l'algorithme est plus pénalisant que le calcul du RFTC par 0 dans 95% des cas, aucune incertitude liée à l'utilisation d'un algorithme simplifié n'est à considérer dans l'établissement des seuils de protection et de surveillance en RFTC avec la MSG.

3.1.8. Incertitudes relatives à l'erreur de représentativité des collectrons (Tracking Error)

Les collectrons sont calibrés de façon périodique sur une carte de flux 3D reconstruite d'après les valeurs d'activation du système AMS.

Après le calibrage, le signal de sortie des collectrons, utilisé dans les chaînes de surveillance et de protection relatives au RFTC est le suivant :

$$P_{i,j}^{DNBR} = I_{i,j} \cdot K_{i,j}^{DNBR}, \text{ en W/cm}$$

Où :

- i varie de 1 à 12 et j varie de 1 à 6,
- $I_{i,j}$ est le courant délivré par le j^{ème} collectron de la i^{ème} canne,
-

 $K_{i,j}^{DNBR}$

est le coefficient de calibrage associé au j^{ème} collectron de la i^{ème} canne pour les calculs de RFTC.

Au moment du calibrage, les coefficients suivant :

 $K_{i,j}^{DNBR}$

sont déterminés en ajustant les signaux collectrons sur la distribution axiale du canal chaud du cœur fournie par la carte de flux 3D. Ainsi, ces coefficients sont calculés comme le rapport suivants :

$$K_{i,j}^{DNBR} = \frac{\bar{P}_j}{I_{i,j}}$$

Où :

- $I_{i,j}$ est le courant délivré par le $j^{\text{ème}}$ collectron de la $i^{\text{ème}}$ canne au moment du calibrage,
-

\bar{P}_j (en W/cm) est la puissance linéique moyenne du canal chaud mesurée au moment du calibrage, sur la hauteur h du collectron j . Soit:

-

$$\bar{P}_j = \frac{1}{h} \int_{z_j - \frac{h}{2}}^{z_j + \frac{h}{2}} P_{CC}(z) dz \quad \text{où } P_{CC}(z) \text{ est la puissance linéique à la cote } z \text{ du canal chaud.}$$

La Tracking Error Δ est la perte de représentativité du RFTC calculé en ligne grâce à la distribution de puissance fournie par les collectrons par rapport au RFTC qui serait calculé avec la distribution de puissance fournie par une carte de flux 3D.

Par définition :

- Une Tracking Error positive implique que la réponse des chaînes de protection et de surveillance est sous-conservative parce que la valeur de RFTC calculée en ligne est surestimée.
- Une Tracking Error négative implique que la réponse des chaînes de protection et de surveillance est sur-conservative parce que la valeur de RFTC calculée en ligne est sous-estimée.

La Tracking Error est calculée Δ en analysant un nombre important de configurations.

3.1.8.1. Tracking Error relative au système de surveillance

L'analyse de la Tracking Error pour le système de surveillance couvre tous les cycles de la première gestion FA3, les deux alternances, trois taux d'épuisement durant la durée naturelle des cycles et trois pas de prolongation de cycle, différentes configurations d'insertion des groupes (entre TGE et groupes aux insertions limites (IL)) et une large plage de ΔI .

Les insertions limites correspondant au jeu d'hypothèses intermédiaire (voir annexe 15B) ont été conservées dans la présente étude. Les IL correspondant à l'état final de conception (voir sous-chapitre 15.1) ont en effet été relevées par rapport à celles correspondant au jeu d'hypothèses intermédiaire. En conséquence les situations correspondant à l'état final de conception sont déjà couvertes par les situations correspondant au jeu d'hypothèses intermédiaire.

La valeur maximale de Tracking Error parmi l'ensemble des configurations est prise en compte pour établir les seuils de surveillance en RFTC.

Les cannes contenant un ou plusieurs collectrons défailants sont invalidées par la chaîne de surveillance en RFTC : c'est-à-dire que les mesures de puissance linéique issues de ces cannes ne sont pas utilisées par le système de surveillance pour évaluer le RFTC minimal. Le seuil « site » de la chaîne de surveillance est automatiquement augmenté lorsque des cannes sont invalidées. La Tracking Error est calculée pour chaque seuil « site » Δ en considérant l'hypothèse conservative que les cannes invalidées sont celles qui fournissent les évaluations les plus faibles du RFTC.

De nombreuses études de sensibilité sont réalisées pour les situations conduisant aux valeurs maximales de Tracking Error. Ces sensibilités visent à évaluer l'impact du phénomène de déséquilibre azimutal de puissance, du fonctionnement prolongé à puissance réduite (FPPR), du fonctionnement en suivi de charge et télé réglage (SCTR), du désalignement d'une grappe de contrôle par rapport à son groupe, des tolérances au moment du calibrage (position des groupes...), du niveau de puissance, et de l'épuisement entre deux calibrages.

Cette analyse montre que la dégradation de la Tracking Error liée aux défaillances collectrons est plus importante sur le premier cycle du fait de sa plus grande hétérogénéité radiale. Ainsi, on distingue deux jeux de valeurs de Tracking Error : l'un spécifique au premier cycle, le second couvrant tous les autres cycles de la première gestion FA3.

L'ensemble des valeurs de Tracking Error pour le système de surveillance (avec et sans défaillances de collectron) est présenté dans le tableau [TAB-4.4.7](#).



3.1.8.2. Tracking Error relative au système de protection

L'analyse de la Tracking Error pour le système de protection couvre les situations valorisant les chaînes de protection bas RFTC. De nombreuses configurations sont analysées, représentatives d'événements comme :

- une Augmentation Excessive de Charge (AEC) ou une Rupture de Tuyauterie Vapeur (RTV),
- un Retrait Incontrôlé d'une Grappe en Puissance (R1GP),
- un Retrait Incontrôlé de Groupe en Puissance (RIGP),
- un dysfonctionnement du RCV conduisant à une baisse de la concentration en bore (dilutions),
- une Chute De Grappe(s) (CDG),
- et également de situations atteintes suite au déclenchement d'un arrêt partiel du réacteur (Partial Trip).

Ces configurations diffèrent par les conditions thermohydrauliques du cœur et par les positions des groupes de régulation. Elles sont générées à partir de toutes les situations de surveillance, afin de constituer un large panel. Pour un seuil de protection donné (générique ou spécifique), la Tracking Error est égale à la valeur maximale des Tracking Error calculées sur les configurations dimensionnant ce seuil. Le critère de défaillance unique est appliqué soit sur un collectron appartenant à la canne dimensionnant la Tracking Error, soit sur un système de mesure de position de grappe.

La Tracking Error associée à chaque seuil « site » de la chaîne de protection en RFTC  est calculée de la même manière que pour le système de surveillance. De plus, des études de sensibilité semblables à celles menées en surveillance sont effectuées, pour chaque seuil, pour les situations conduisant aux valeurs maximales de Tracking Error.

Du fait des valeurs plus élevées de Tracking Error sur le premier cycle, et par cohérence avec la Tracking Error en surveillance, on distingue deux jeux de valeurs de Tracking Error : l'un spécifique au premier cycle, le second couvrant tous les autres cycles de la première gestion FA3.

L'ensemble des valeurs de Tracking Error pour le système de protection associées aux seuils « site » génériques et spécifiques est présenté dans le tableau [TAB-4.4.8](#).



3.1.9. Incertitudes relatives au débit absolu et au by-pass cœur

Les calculs de RFTC sont réalisés avec le débit de conception minimum, soit le débit de conception thermohydraulique qui est inférieur  au débit le plus probable.

De plus, on admet qu'un maximum [] du débit thermohydraulique est inefficace en termes de capacité d'évacuation de la chaleur du cœur du fait que cette part du débit contourne le cœur par les divers cheminements du fluide disponibles dans la cuve et décrits dans le [§ 2.4.1.](#)

3.1.10. Incertitudes relatives à la distribution de puissance

L'établissement des seuils de protection et de surveillance et la vérification des critères en RFTC sont effectués en utilisant la distribution de puissance la plus défavorable dans chaque cas.

Lorsque la distribution de puissance évolue de manière significative pendant un événement (par exemple dans le cas de l'accident d'éjection d'une grappe), la distribution de puissance est calculée en prenant compte des hypothèses spécifiques de l'événement. Lorsque la distribution de puissance évolue peu ou si son influence est faible, les calculs [] sont réalisés avec une distribution radiale de conception combinée avec une distribution axiale spécifique pour avoir la distribution de puissance en 3D.

Les résultats d'une étude de sensibilité avec le code de calcul montrent que le RFTC minimal dans le canal chaud est relativement peu sensible aux variations de la distribution radiale de la puissance sur l'ensemble du cœur (pour la même valeur de $F\Delta H$).

3.1.11. Incertitude relative aux fluctuations de flux neutronique

Le démarrage des premiers EPR a mis en évidence une amplitude importante des fluctuations des signaux mesurés par les collectrons, qui résulte de réelles Fluctuations de Flux Neutronique (FFN) au sein du cœur (voir sous-chapitre 15.1).

Pour les transitoires de type I et de type II, l'approche vis-à-vis des facteurs de point chaud conduit à la prise en compte d'une incertitude FFN au niveau du remontage des seuils site pour la chaîne de surveillance et pour les chaînes de protection bas RFTC. Ces incertitudes se décomposent en une part aléatoire ($\sigma(\epsilon_{FFN, type II})$ en surveillance et $\sigma(\epsilon_{FFN, type I})$ en protection) et une part systématique ($\mu(\epsilon_{FFN, type II})$ en surveillance et $\mu(\epsilon_{FFN, type I})$ en protection).

L'ensemble des valeurs d'incertitude FFN pour le 1^{er} cycle (avec et sans défaillances de collectron) est présenté dans le tableau [TAB-4.4.3](#) pour le système de surveillance et dans le tableau [TAB-4.4.8](#) pour le système de protection (incertitudes associées aux seuils « site » génériques et spécifiques). Pour les cycles ultérieurs au 1^{er} cycle, le réglage des seuils site sera actualisé dans les justifications spécifiques des cycles concernés afin d'intégrer l'incertitude FFN.

3.2. INCERTITUDES AFFECTANT LA PUISSANCE LINÉIQUE

Les paragraphes suivants décrivent les différentes incertitudes qui affectent la puissance linéique et détaillent leurs valeurs respectives.

L'établissement de l'incertitude globale relative à la puissance linéique est basé sur un cumul quadratique des incertitudes aléatoires et un cumul arithmétique des biais systématiques. Ces différentes incertitudes sont récapitulées dans le tableau [TAB-4.4.9](#).

3.2.1. Incertitudes relatives aux paramètres physiques mesurés

La puissance linéique est directement issue des mesures de l'instrumentation neutronique interne (les collectrons) qui sont calibrées périodiquement sur les cartes de flux fournies grâce au système AMS.

De même que pour le RFTC, l'incertitude globale relative à la mesure de puissance locale peut être divisée en trois postes indépendants :

- L'incertitude sur la précision de la carte de flux reconstruite à partir des mesures AMS (prenant en compte la précision du taux d'activation, la reconstruction de la densité de puissance relative, la discrétisation du taux d'épuisement et le nombre d'assemblages instrumentés). Cette incertitude se décompose en un biais systématique [] et en une part aléatoire [].

- L'incertitude sur la précision des signaux des collectrons (erreur de mesure du courant, évolution de la composition isotopique de l'émetteur du collectron).[]
- L'incertitude sur l'évaluation de la puissance au secondaire par bilan enthalpique qui est utilisée pour le calibrage des collectrons.[]

3.2.2. Incertitudes relatives aux paramètres de fabrication

De même que pour le RFTC, ces incertitudes prennent en compte les variations de la fabrication en termes de matériau et de géométrie des crayons et assemblages combustibles. Pour la puissance linéique, ces incertitudes relatives aux paramètres de fabrication sont représentées par le facteur technologique de point chaud :

$$F_Q^E$$

Cette incertitude est utilisée pour évaluer le pic de puissance local maximal (le point chaud) et elle est déterminée par combinaison statistique des tolérances relatives au diamètre, à la densité et au taux d'enrichissement de la pastille.

La valeur relative au combustible AFA3G-LE qui sera utilisée pour la première gestion FA3 est égale à []% pour le premier cycle et à []% pour les autres cycles.

3.2.3. Incertitudes relatives au fléchissement des crayons dans le réacteur

De même que pour le RFTC, le fléchissement des crayons affecte la distribution de puissance locale au voisinage des crayons fléchis.

La valeur considérée pour établir les seuils de protection et de surveillance relatifs à la puissance linéique est de []%.

3.2.4. Incertitudes relatives à l'erreur de représentativité des collectrons (Tracking Error)

Les collectrons sont calibrés de façon périodique sur une carte de flux 3D reconstruite d'après les valeurs d'activation du système AMS.

Après le calibrage, le signal de sortie des collectrons, utilisé dans les chaînes de surveillance et de protection relatives à la puissance linéique, est le suivant :

$$P_{i,j}^{LPD} = I_{i,j} \cdot K_{i,j}^{LPD}, \text{ en W/cm}$$

Où :

- i varie de 1 à 12 et j varie de 1 à 6,
- $I_{i,j}$ est le courant délivré par le $j^{\text{ème}}$ collectron de la $i^{\text{ème}}$ canne,
-

$K_{i,j}^{LPD}$ est le coefficient de calibrage associé au $j^{\text{ème}}$ collectron de la $i^{\text{ème}}$ canne pour les calculs de puissance linéique.

Le cœur est divisé en 6 tranches axiales qui représentent les zones de surveillance des collectrons. Les limites d'une zone de surveillance sont soit le début de la longueur chauffante, soit sa fin, soit le milieu de l'intervalle axial entre deux collectrons successifs.

Au moment du calibrage, les coefficients :

$$K_{i,j}^{LPD}$$

Sont déterminés en ajustant les signaux collectrons sur la puissance linéique maximale de la zone de surveillance axiale du collectron concerné fournie par la carte de flux 3D.

Ainsi, ces coefficients sont calculés comme le rapport suivant :

$$K_{i,j}^{LPD} = \frac{P_j^{\max}}{I_{i,j}}$$

Où :

- $I_{i,j}$ est le courant délivré par le $j^{\text{ème}}$ collectron de la $i^{\text{ème}}$ canne au moment du calibrage ;

-

$$P_j^{\max}$$

(en W/cm) est la puissance linéique maximale de la zone de surveillance j mesurée au moment du calibrage.

La Tracking Error Δ est la perte de représentativité de la puissance linéique calculée en ligne avec la distribution de puissance fournie par les collectrons par rapport à la puissance linéique qui serait calculée avec la distribution de puissance fournie par une carte de flux 3D.

Par définition :

- Une Tracking Error positive implique que la réponse des chaînes de protection et de surveillance est sous-conservative parce que la valeur de puissance linéique calculée en ligne est sous-estimée ;
- Une Tracking Error négative implique que la réponse des chaînes de protection et de surveillance est sur-conservative parce que la valeur de puissance linéique calculée en ligne est sur-estimée.

La Tracking Error est calculée Δ en analysant un nombre important de configurations.

3.2.4.1. Tracking Error relative au système de surveillance

L'analyse de la Tracking Error pour le système de surveillance couvre tous les cycles de la première gestion FA3, les deux alternances, quatre taux d'épuisement durant la durée naturelle des cycles et trois pas de prolongation de cycle, différentes configurations d'insertion des groupes (entre TGE et groupes aux IL) et une large plage de ΔI .

Les insertions limites correspondant au jeu d'hypothèses intermédiaire (voir annexe 15B) ont été conservées dans la présente étude. Les IL correspondant à l'état final de conception (voir sous-chapitre 15.1) ont en effet été relevées par rapport à celles correspondant au jeu d'hypothèses intermédiaire. En conséquence les situations correspondant à l'état final de conception sont déjà couvertes par les situations correspondant au jeu d'hypothèses intermédiaire.

La valeur maximale de Tracking Error parmi l'ensemble des configurations est prise en compte pour établir les seuils de surveillance en puissance linéique.

En cas de défaillances de collectrons, le seuil « site » de la chaîne de surveillance en puissance linéique est automatiquement abaissé en fonction de la localisation des défaillances. Δ . La Tracking

Error associée à chaque seuil « site » σ est calculée en considérant les défaillances de collectrons qui conduisent à la valeur de Tracking Error la plus élevée.

De nombreuses études de sensibilité sont réalisées pour les situations conduisant aux valeurs maximales de Tracking Error. Ces sensibilités visent à évaluer l'impact du phénomène de déséquilibre azimutal de puissance, du fonctionnement prolongé à puissance réduite (FPPR), du fonctionnement en suivi de charge et télé réglage (SCTR), du désalignement d'une grappe de contrôle par rapport à son groupe, des tolérances au moment du calibrage (position des groupes...), du niveau de puissance, et de l'épuisement entre deux calibrages.

Trois jeux de valeurs de Tracking Error sont distingués : deux spécifiques à l'épuisement naturel, le troisième couvrant la prolongation de cycle.

L'ensemble des valeurs de Tracking Error pour le système de surveillance (avec et sans défaillances de collectron) est présenté dans le tableau [TAB-4.4.10](#).

3.2.4.2. Tracking Error relative au système de protection

L'analyse de la Tracking Error pour le système de protection couvre les situations valorisant les chaînes de protection puissance linéique élevée. De nombreuses configurations sont analysées, explicitées au [§ 3.1.8.2](#) ; elles diffèrent par les conditions thermohydrauliques du cœur et par les positions des groupes de régulation. Elles sont générées à partir de toutes les situations de surveillance, afin de constituer un large panel. Le critère de défaillance unique est appliqué soit sur le collectron dimensionnant la Tracking Error, soit sur un système de mesure de position de grappe.

La valeur maximale de Tracking Error parmi l'ensemble des configurations est prise en compte pour établir les seuils de protection en puissance linéique.

En cas de défaillances de collectrons, le seuil « site » de la chaîne de protection en puissance linéique est automatiquement abaissé en fonction de la localisation des défaillances. σ . La Tracking Error associée à chaque seuil « site » σ est calculée en considérant les défaillances de collectrons qui conduisent à la valeur de Tracking Error la plus élevée.

Les Tracking Error relatives aux configurations de Partial Trip sont associées au seuil spécifique $PCI_{RT RD}$ lorsqu'un signal de chute de grappe (RD) est détecté. La chaîne $PCI_{RT RD}$ étant également utilisée pour protéger la gaine du combustible contre le risque de rupture par interaction pastille-gaine en cas de transitoire de chute de grappe(s) (voir section 19.3.3.1), le réglage de ce seuil sera in fine retenu de manière à garantir simultanément ces deux fonctions.

Comme pour la chaîne de surveillance, la défaillance de collectrons conduit à une diminution automatique du seuil « site » de la chaîne de protection en puissance linéique. Pour chaque seuil « site » σ , la Tracking Error associée est calculée de la même manière que pour le système de surveillance. De plus, des études de sensibilité semblables à celles menées en surveillance sont effectuées pour les situations conduisant aux valeurs maximales de Tracking Error.

Trois jeux de valeurs de Tracking Error sont distingués : deux spécifiques à l'épuisement naturel, le troisième couvrant la prolongation de cycle.

L'ensemble des valeurs de Tracking Error pour le système de protection associées aux seuils « site » génériques et spécifiques est présenté dans le tableau [TAB-4.4.11](#).

3.2.5. Incertitude relative aux fluctuations de flux neutronique

De même que pour le RFTC, l'approche mise en oeuvre afin de prendre en compte l'impact des FFN pour les transitoires de type I et de type II vis-à-vis des critères thermiques du combustible conduit à la prise en compte d'une incertitude FFN au niveau du remontage des seuils site pour la chaîne de surveillance et pour les chaînes de protection puissance linéique élevée. Cette incertitude se décompose en une part aléatoire ($Q95(\epsilon_{FFN, type II}) - \mu(\epsilon_{FFN, type II})$ en surveillance, $Q95(\epsilon_{FFN, type I}) - \mu(\epsilon_{FFN, type I})$ en protection) et une part systématique ($(\mu(\epsilon_{FFN, type II})$ en surveillance et $\mu(\epsilon_{FFN, type I})$ en protection)).

L'ensemble des valeurs d'incertitude FFN pour le 1^{er} cycle (avec et sans défaillances de collectron) est présenté dans le tableau [TAB-4.4.10](#) pour le système de surveillance et dans le tableau [TAB-4.4.11](#) pour le système de protection (incertitudes associées aux seuils « site » génériques et spécifiques). Pour les cycles ultérieurs au 1^{er} cycle, le réglage des seuils site sera actualisé dans les justifications spécifiques des cycles concernés afin d'intégrer l'incertitude FFN.

4. SEUILS ET CRITÈRES

4.1. SEUILS ET CRITÈRES EN RFTC

4.1.1. Seuil de surveillance DNB_{LCO}

La valeur « étude » du seuil de surveillance en RFTC intègre la variation maximale de RFTC pendant les événements pour lesquels la protection bas RFTC n'est pas efficace et qui valorisent la surveillance du RFTC. La variation maximale est obtenue pour le transitoire de perte totale d'alimentation électrique externe de courte durée (PTAEE<2h)[] (voir section 15.2.2h).

Les statepoints utilisés pour établir la valeur « site » du seuil de surveillance en RFTC (DNB_{LCO}) avec la MSG sont fournis dans le tableau [TAB-4.4.6](#).

Les seuils « site » de surveillance résultant de l'application des incertitudes définies au [§ 3.1](#), sont donnés dans le tableau [TAB-4.4.7](#) en fonction du nombre de cannes invalidées[].

4.1.2. Seuils de protection DNB_{RT} , $DNB_{RT\text{IMB/RD}}$, $DNB_{RT\text{RD}}$, $DNB_{RT\text{IL}}$

La valeur « étude » du seuil de protection par bas RFTC vaut [].

Les statepoints utilisés pour établir la valeur « site » des seuils de protection par bas RFTC (génériques et spécifiques) avec la MSG sont fournis dans le tableau [TAB-4.4.6](#).

Les seuils « site » de protection résultant de l'application des incertitudes définies au [§ 3.1](#), sont donnés dans le tableau [TAB-4.4.8](#) en fonction du nombre de cannes invalidées[].

4.1.3. Critère de conception $DNBR_{\text{Design Limit}}$

Comme évoqué dans le [§ 2.3.2](#), le critère de conception $DNBR_{\text{Design Limit}}$ est utilisé pour l'analyse des événements de Type III pour vérifier l'absence de crise d'ébullition.

[]

Pour les faibles pressions [], aucune pénalité liée au fléchissement des crayons n'est à considérer. Les valeurs de $DNBR_{\text{Design Limit}}$ [] sont alors égales aux limites d'Owen définies dans les [§ 2.5.3](#), et [§ 2.5.4](#).

4.1.4. Seuil DNB_{SAL}

Le seuil DNB_{SAL} correspond au RFTC minimal garanti en fonctionnement normal par la chaîne de surveillance en RFTC lorsque toutes les incertitudes sont prises en compte excepté l'incertitude de la corrélation et la pénalité de fléchissement. Ce seuil est déterminé spécifiquement pour l'évaluation du nombre de crayons entrant en crise d'ébullition puisque cette évaluation intègre déjà l'incertitude de la corrélation et la pénalité de fléchissement (via l'utilisation de paramètres statistiques pénalisés).

Lorsque le RFTC mesuré par la chaîne de surveillance est égal aux seuils « site » DNB_{LCO} , alors le RFTC pénalisé par l'ensemble des incertitudes excepté l'incertitude de la corrélation et la pénalité de fléchissement doit être supérieur au seuil DNB_{SAL} avec une probabilité au moins égale à 95% avec un niveau de confiance de 95%. Le seuil « étude » DNB_{SAL} est déterminé de manière à retrouver, par application de la méthode statistique généralisée, les seuils « site » DNB_{LCO} .

[]

4.2. SEUILS EN PUISSANCE LINÉIQUE

4.2.1. Seuil de surveillance HLPD_{LCO}

La surveillance de puissance linéique est dimensionnée par l'étude d'APRP. [□](#)

Les seuils « site » de surveillance HLPD_{LCO} résultant de l'application des incertitudes définies dans le [§ 3.2.](#) sont donnés dans le tableau [TAB-4.4.10](#) [□](#).

4.2.2. Seuils de protection HLPD_{RT} et PCI_{RT RD}

La protection en puissance linéique est dimensionnée par le critère de non fusion à cœur du combustible. [□](#)

Les seuils « site » de protection HLPD_{RT} résultant de l'application des incertitudes définies dans le [§ 3.2.](#) sont donnés dans le tableau [TAB-4.4.11](#) [□](#).

Les seuils « site » de protection PCI_{RT RD} résultant de l'application des incertitudes définies dans le [§ 3.2.](#) sont donnés dans le tableau [TAB-4.4.11](#) [□](#). Il s'agit des valeurs de seuils « site » de la chaîne de protection PCI_{RT RD} qui garantissent l'efficacité de cette chaîne contre le risque de fusion pour les événements conduisant au déclenchement d'un Partial Trip. La chaîne PCI_{RT RD} étant également utilisée pour protéger la gaine combustible contre le risque de rupture par interaction pastille-gaine en cas de chute de grappe(s) (voir section 19.3.3.1), le réglage de ces seuils sera in fine réalisé de manière à garantir simultanément ces deux fonctions.



RAPPORT DE SURETE

— DE FLAMANVILLE 3 —

Version Publique

Edition DEMANDE DE MISE EN SERVICE

CHAPITRE 4

SECTION 4

PAGE 33/59

CENTRALES NUCLÉAIRES

Palier EPR

LISTE DES RÉFÉRENCES

TAB-4.4.1 PARAMÈTRES DE CONCEPTION THERMO-HYDRAULIQUE

Puissance nominale du cœur (MWth)	4300
Nombre de boucles	4
Pression nominale du circuit primaire (absolue) (MPa)	15,5
Débit réfrigérant :	
Section de passage du cœur (m ²)	5,9
Vitesse moyenne dans le cœur (m/s)	5
Vitesse massique moyenne dans le cœur (g/cm ² /s)	□
Débit massique total (kg/s)	□
Débit massique dans le cœur (t/h)	75371
Débit de conception thermohydraulique /boucle (m ³ /h)	□
Débit le plus probable/boucle (m ³ /h)	28330
Débit de conception mécanique/boucle (m ³ /h)	□
Température du réfrigérant (°C) :	
Température nominale d'entrée	297,1
Augmentation moyenne dans la cuve	32,6
Augmentation moyenne dans le cœur	34,3
Moyenne dans le cœur	315,3
Moyenne dans la cuve	313,4
Échange de chaleur :	
Flux thermique moyen dans le cœur (W/cm ²)	52,3
Flux thermique maximum dans le cœur (fonctionnement nominal) (W/cm ²)	150,8
Puissance linéique moyenne (géométrie à froid) (W/cm)	156,1
Puissance linéique maximale pour des conditions nominales de fonctionnement (W/cm)	□
Point de consigne de protection contre les pics de puissance linéique (W/cm)	□

PARAMÈTRES DE CONCEPTION THERMO-HYDRAULIQUE (SUITE)

RFTC (pour illustration) :	
RFTC minimal \square dans les conditions normales de fonctionnement \square	2,44
Assemblage combustible :	
Nombre d'assemblages combustibles	241
Pas entre assemblages combustibles (cm)	21,504
Hauteur active du combustible (cm)	420
Pas du réseau (cm)	1,26
Nombre de crayons combustibles par assemblage	265
Nombre de tubes guides par assemblage	24
Diamètre extérieur du crayon combustible (cm)	0,95
Diamètre du tube guide (cm)	1,245
Caractéristiques de puissance du cœur :	
Densité de puissance à chaud (kW/cœur/10 ⁻³ m ³)	\square

**TAB-4.4.2 DÉBIT DE CONTOURNEMENT DU CŒUR ET
PERTES DE CHARGE DANS LA CUVE ET DANS LE CŒUR**

□

TAB-4.4.3 INCERTITUDES RELATIVES AU RFTC

□

TAB-4.4.4 BASE UTILISÉE POUR AJUSTER
L'ALGORITHME DE CALCUL DU RFTC SUR LE CODE DE
RÉFÉRENCE □

□

TAB-4.4.5 CARACTÉRISATION DE L'ÉCART EN RFTC ENTRE □ ET L'ALGORITHME

□

TAB-4.4.6 STATEPOINTS UTILISÉS POUR ÉTABLIR LES SEUILS EN RFTC (MSG)

□



□



□



□



RAPPORT DE SURETE

— DE FLAMANVILLE 3 —

Version Publique

Edition DEMANDE DE MISE EN SERVICE

CHAPITRE 4

SECTION 4

PAGE 44/59

CENTRALES NUCLÉAIRES

Palier EPR

**TAB-4.4.7 TRACKING ERROR ET SEUILS DE
SURVEILLANCE EN RFTC**

□



RAPPORT DE SURETE

— DE FLAMANVILLE 3 —

Version Publique

Edition DEMANDE DE MISE EN SERVICE

CHAPITRE 4

SECTION 4

PAGE 45/59

CENTRALES NUCLÉAIRES

Palier EPR

TAB-4.4.8 TRACKING ERROR, INCERTITUDES FFN ET SEUILS DE PROTECTION EN RFTC

□



RAPPORT DE SURETE

— DE FLAMANVILLE 3 —

Version Publique

Edition DEMANDE DE MISE EN SERVICE

CHAPITRE 4

SECTION 4

PAGE 46/59

CENTRALES NUCLÉAIRES

Palier EPR

□

TAB-4.4.9 INCERTITUDES RELATIVES À LA PUISSANCE LINÉIQUE

□

TAB-4.4.10 TRACKING ERROR, INCERTITUDES FFN ET SEUILS DE SURVEILLANCE EN PUISSANCE LINÉIQUE

□

TAB-4.4.11 TRACKING ERROR, INCERTITUDES FFN ET SEUILS DE PROTECTION EN PUISSANCE LINÉIQUE

□



□

FIG-4.4.1 TAUX DE VIDE EN FONCTION DU TITRE THERMO-DYNAMIQUE

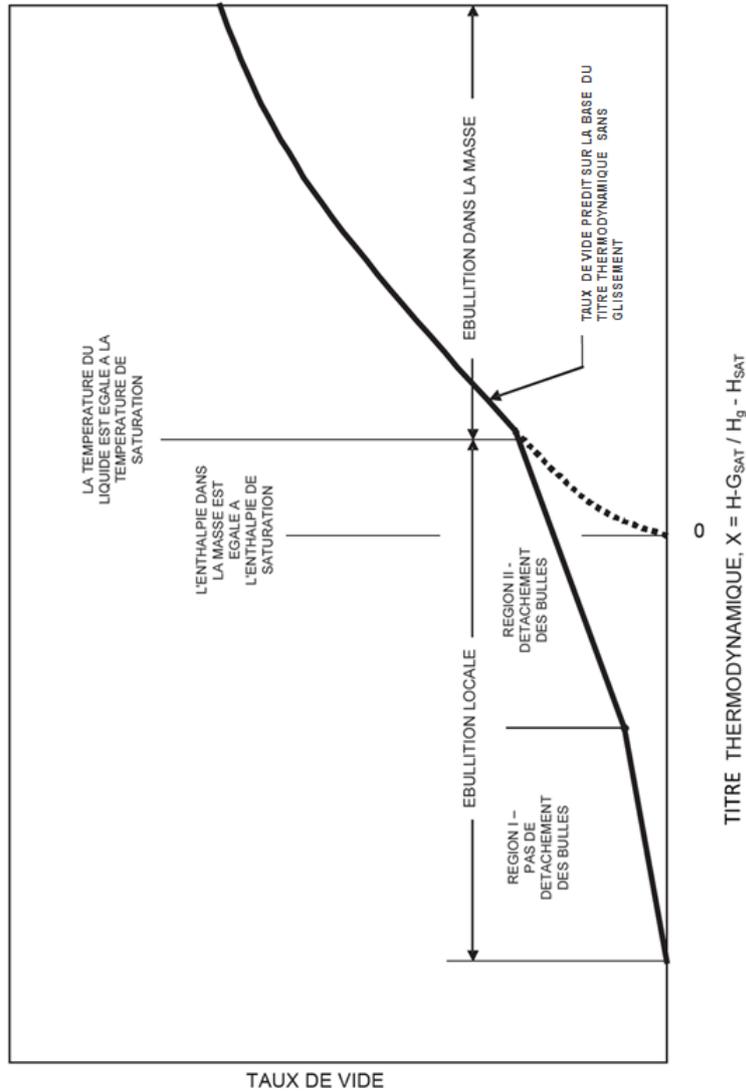


FIG-4.4.2 APPROCHE GLOBALE D'ANALYSE DES ÉVÉNEMENTS
PCC VIS-À-VIS DU RFTC

FIG-4.4.3 POSITIONS RADIALES ET AXIALES DES COLLECTRONS

□

FIG-4.4.4 POSITIONS AXIALES DES COLLECTRONS DANS UN ASSEMBLAGE 





FIG-4.4.5 POSITIONS DE L'AMS DANS LE CŒUR

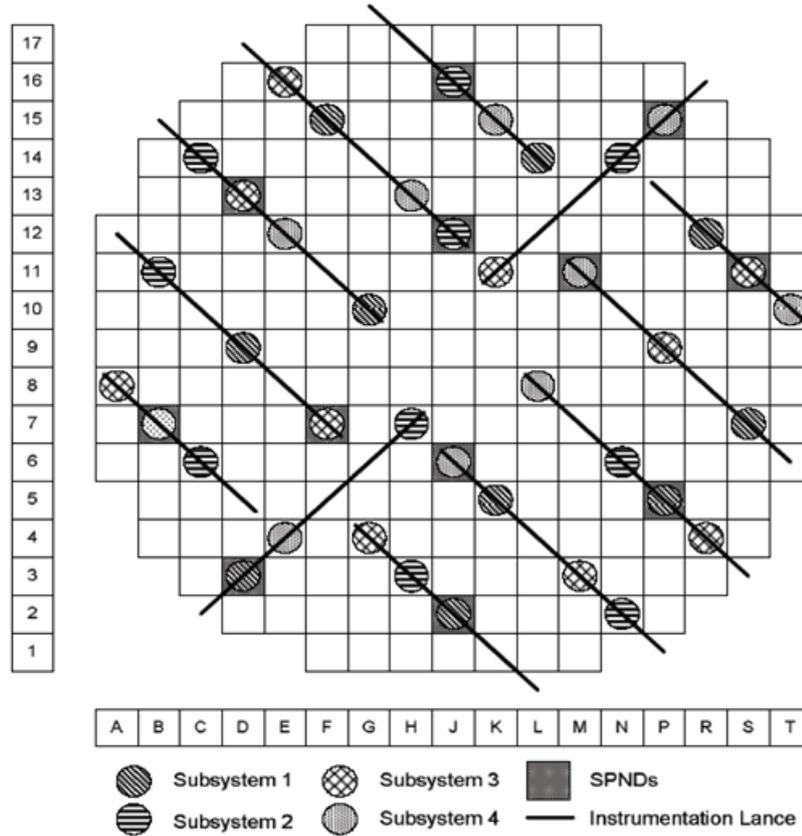
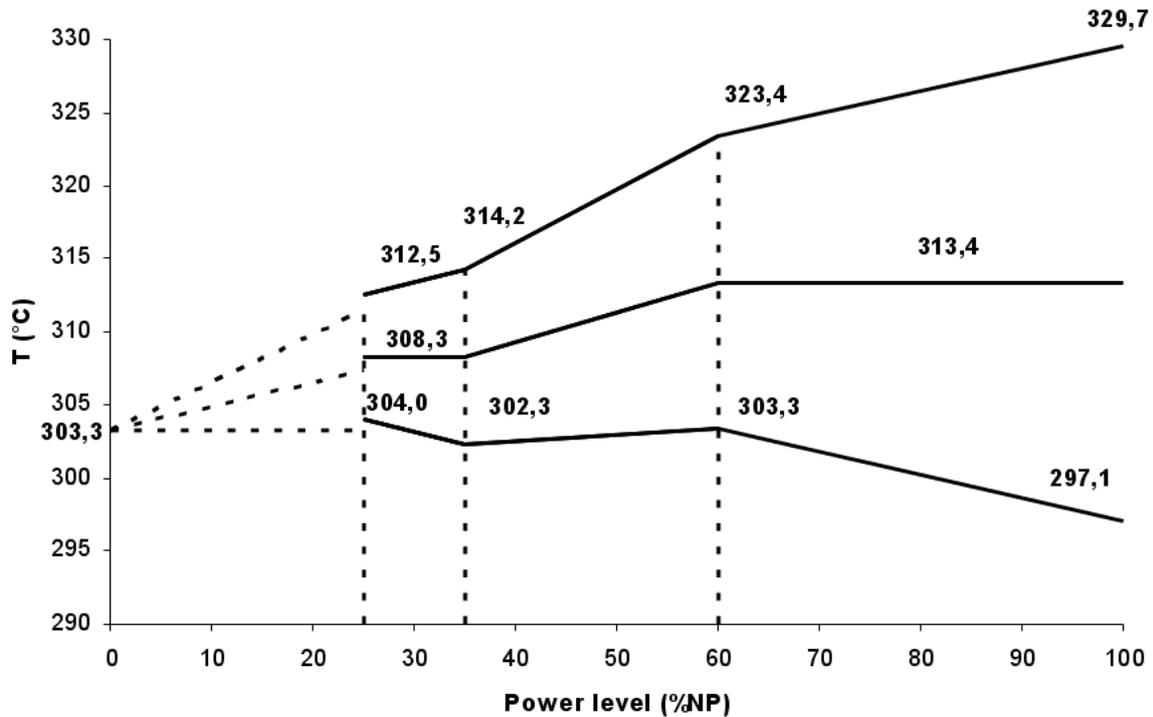
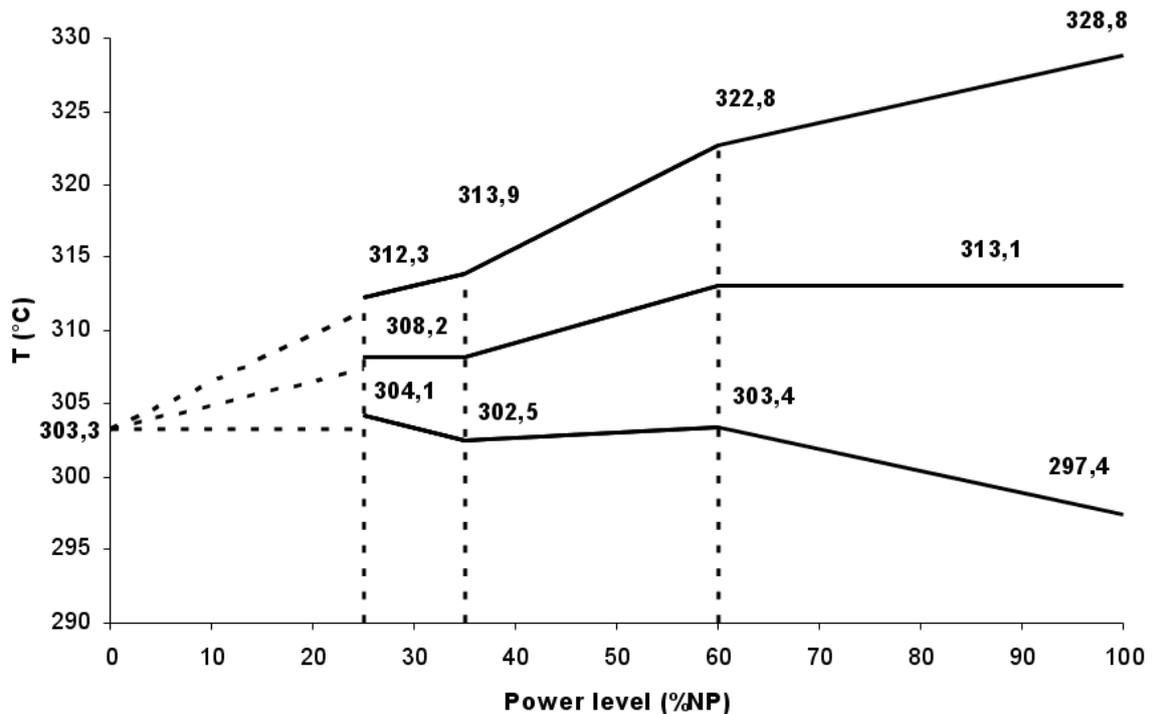


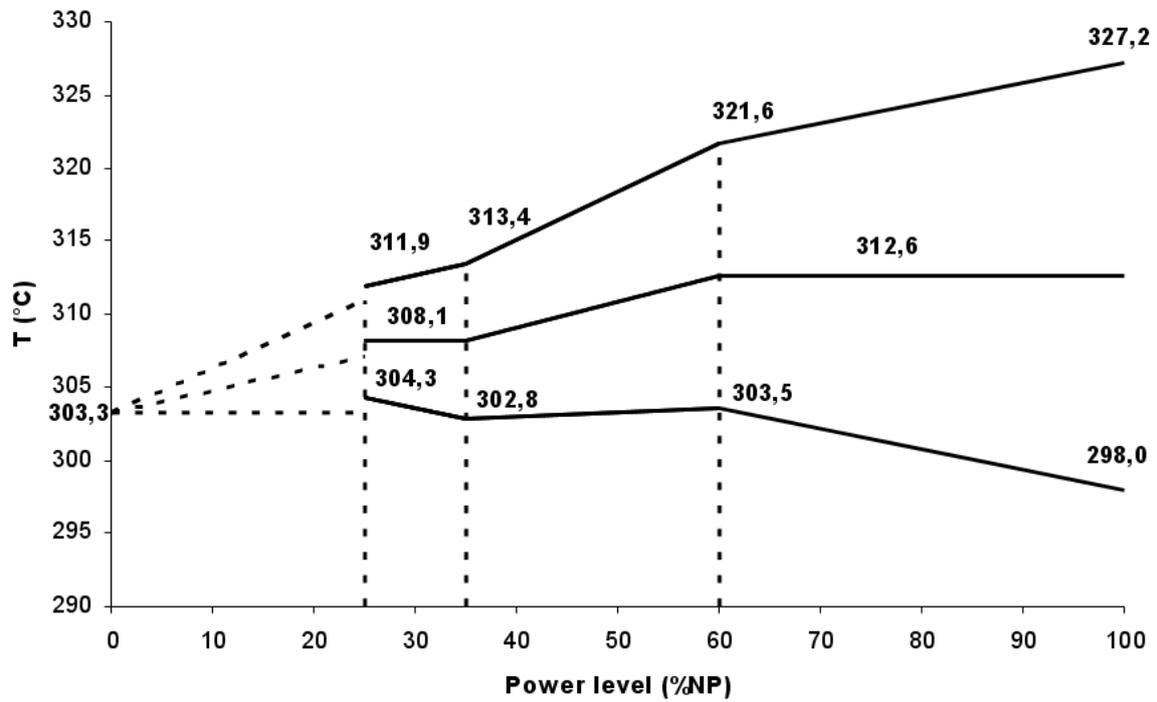
FIG-4.4.6 PROGRAMME DE TEMPÉRATURE (AU DÉBIT THERMO-HYDRAULIQUE)



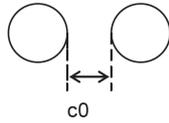
Programme de température (au débit le plus probable)



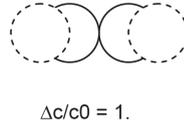
Programme de température (au débit mécanique)



**FIG-4.4.7 MODÈLE DE FLÉCHISSEMENT DU CRAYON -
FERMETURE DU CANAL EN FONCTION DE L'ÉPUISEMENT DU
COMBUSTIBLE**



$\Delta c/c_0 = 0.$



□

**FIG-4.4.8 PÉNALITÉ RFTC EN FONCTION DE LA FERMETURE DU
CANAL (MODÈLE NRC 1979)**

□

SOMMAIRE

.4.5	CONTRÔLE DE LA RÉACTIVITÉ	3
0.	EXIGENCES DE SÛRETÉ	3
0.1.	FONCTION DE SÛRETÉ	3
0.2.	CRITÈRES FONCTIONNELS	3
0.3.	EXIGENCES DE CONCEPTION	3
0.4.	ESSAIS ET VÉRIFICATIONS	3
1.	BASES DE CONCEPTION	3
1.1.	TAUX MAXIMUM D'INSERTION DE RÉACTIVITÉ	4
1.2.	MARGES D'ARRÊT	4
1.3.	SOUS-CRITICITÉ	5
1.3.1.	SOUS-CRITICITÉ SUITE À UN ARRÊT AUTOMATIQUE DU RÉACTEUR	5
1.3.2.	SOUS-CRITICITÉ EN ÉTAT D'ARRÊT	5
2.	DESCRIPTION DES ASPECTS FONCTIONNELS DE LA CONCEPTION DES SYSTÈMES	6
2.1.	LE SYSTÈME DE COMMANDE DES GRAPPES DE CONTRÔLE (RGL)	6
2.2.	LE SYSTÈME DE CONTRÔLE VOLUMÉTRIQUE ET CHIMIQUE (RCV) ET LE SYSTÈME DE BORICATION DE SÉCURITÉ (RBS)	6
2.3.	LE SYSTÈME D'INJECTION DE SÉCURITÉ (RIS)	7
2.4.	INFORMATIONS CONCERNANT LES PERFORMANCES CUMULÉES DES SYSTÈMES DE RÉACTIVITÉ	7
3.	ÉVALUATION DE LA CONCEPTION	7
	LISTE DES RÉFÉRENCES.	8



RAPPORT DE SURETE

— DE FLAMANVILLE 3 —

Version Publique

Edition DEMANDE DE MISE EN SERVICE

CHAPITRE 4

SECTION 5

PAGE 2/10

CENTRALES NUCLÉAIRES

Palier EPR

TABLEAUX :

TAB-4.5.1 PARAMÈTRES DE CONCEPTION NUCLÉAIRE (MARGES D'ARRÊT).....	9
TAB-4.5.2 PARAMÈTRES DE CONCEPTION NUCLÉAIRE (CONCENTRATIONS EN BORE).....	10

.4.5 CONTRÔLE DE LA RÉACTIVITÉ

0. EXIGENCES DE SÛRETÉ

0.1. FONCTION DE SÛRETÉ

La fonction de sûreté assurée par la conception fonctionnelle des systèmes de contrôle de la réactivité est de contrôler la réactivité du cœur pour permettre l'arrêt de la réaction en chaîne en toutes circonstances et l'arrêt du réacteur dans un état d'arrêt sûr.

La conception fonctionnelle des systèmes de contrôle de la réactivité doit garantir le respect de ces fonctions de sûreté pour toutes les conditions de fonctionnement de référence (PCC 1 à 4) et contribuer à leur respect dans les conditions correspondant aux catégories de réduction du risque RRC-A ainsi qu'en situation d'accident grave.

0.2. CRITÈRES FONCTIONNELS

La réactivité du cœur doit être contrôlée dans toutes les conditions de fonctionnement normal, du démarrage du réacteur jusqu'à son arrêt, par deux moyens diversifiés.

L'un consiste à utiliser les grappes de contrôle, l'autre à faire varier la concentration en bore soluble dans le fluide de refroidissement. Ces deux moyens sont fonctionnellement complémentaires pour assurer la maîtrise de la réactivité.

Dans les états d'arrêt standards où la totalité des grappes est insérée dans le cœur, le bilan de réactivité tient compte de l'anti-réactivité apportée par les grappes de contrôle et d'arrêt et de l'anti-réactivité apportée par la concentration en bore du primaire.

0.3. EXIGENCES DE CONCEPTION

La conception fonctionnelle des systèmes de contrôle de la réactivité n'est pas soumise à des exigences de conception spécifiques. Cependant, les fonctions de sûreté qu'elle assure nécessitent l'application d'un programme d'assurance qualité dont l'objectif est de documenter et de contrôler les activités associées.

Il est évident que les systèmes qui réalisent les fonctions relatives au contrôle de la réactivité doivent respecter les exigences de conception. Chaque système devra répondre aux exigences de conception décrites à la section se rapportant à ce système.

0.4. ESSAIS ET VÉRIFICATIONS

La conformité du cœur par rapport à la conception fonctionnelle du contrôle de la réactivité sera vérifiée par des contrôles physiques, tout au long de la vie de la centrale.

1. BASES DE CONCEPTION

Ce chapitre décrit les bases de conception et les exigences fonctionnelles utilisées dans la conception fonctionnelle des systèmes de contrôle de la réactivité.

Comme cela est précisé au [§ 0.1.](#), les fonctions de sûreté doivent être remplies dans toutes les conditions de fonctionnement de la centrale. Les conditions de fonctionnement de référence (PCC) sont classées en quatre catégories, selon la fréquence estimée de leur apparition (voir sous-chapitre 15.0).

Les objectifs de sûreté sont définis notamment en termes de limites radiologiques. Ces objectifs de sûreté sont ensuite déclinés en critères de sûreté pour chaque condition de référence (voir sous-chapitre 15.0). Aux critères de sûreté associés à la tenue des barrières de confinement sont associés

des phénomènes physiques limitatifs susceptibles de leur porter atteinte. Ces critères qualitatifs sont ensuite déclinés quantitativement en critères techniques d'acceptation.

Ces critères incluent à la fois :

- des critères quantitatifs découlant directement du respect des exigences de sûreté (limites physiques) ;
- des critères quantitatifs introduits pour des raisons pratiques, afin de réaliser séparément les calculs thermohydrauliques et neutroniques d'une part et les calculs radiologiques d'autre part (valeurs découplées permettant de s'assurer de manière simplifiée du respect des objectifs radiologiques).

Généralement, pour la conception fonctionnelle du contrôle de la réactivité, ces critères techniques d'acceptation sont déclinés en termes de niveau de sous-criticité minimum à respecter en fonctionnement normal ou en cas d'accident.

1.1. TAUX MAXIMUM D'INSERTION DE RÉACTIVITÉ

Le taux maximum d'insertion de réactivité dû au retrait des grappes de commande en puissance ou à la dilution du bore est limité. Pour un fonctionnement normal en puissance, la variation maximale de réactivité en cas de retrait accidentel des groupes de commande est définie (voir tableau 4.3 TAB 1) de telle manière que le pic de puissance thermique et le RFTC (Rapport de Flux Thermique Critique) ne dépassent pas les limites fixées en cas de surpuissance.

L'augmentation de réactivité due au retrait accidentel d'une ou plusieurs grappes de contrôle est limitée par la vitesse maximale de la grappe (ou par sa course) et par l'efficacité de la (ou des) grappe(s). La vitesse maximale d'une grappe de contrôle (voir tableau 4.3 TAB 1) est telle que le taux maximum de variation de la réactivité, lors d'un retrait accidentel des grappes, est inférieur à sa limite. Pendant le fonctionnement normal en puissance, la variation maximum de réactivité est inférieure à la valeur de variation maximum de conception.

Les taux de variation de la réactivité sont calculés de manière conservative, en supposant que l'on ait des distributions axiales de puissance et de xénon défavorables.

Le taux d'insertion de réactivité correspondant à la décroissance du xénon au pic est bien inférieur au taux maximum d'augmentation de la réactivité dans le cadre d'un fonctionnement normal (voir tableau 4.3 TAB 1).

1.2. MARGES D'ARRÊT

Une marge d'arrêt suffisante et une certaine sous-criticité sont requises, respectivement dans les conditions de fonctionnement en puissance et dans les conditions d'arrêt.

Deux systèmes indépendants de contrôle de la réactivité sont mis en place, à savoir les grappes de contrôle et le bore soluble dans le fluide de refroidissement.

Le système des grappes de contrôle peut compenser les effets de la réactivité dus à des changements de température du combustible et du modérateur qui accompagnent les changements de niveau de puissance lors du passage réacteur en puissance à puissance nulle. De plus, le système des grappes de contrôle procure une marge d'arrêt minimum en cas d'accident, et il est capable d'assurer la sous-criticité du cœur suffisamment rapidement pour éviter le dépassement des limites acceptables d'endommagement du combustible, en supposant que la grappe de contrôle la plus efficace reste coincée hors du cœur lors de l'arrêt automatique du réacteur.

Les systèmes de borication peuvent compenser toutes les variations de concentration du xénon et variations de densité entraînant des changements de réactivité, et ils doivent permettre au réacteur d'aller vers l'arrêt à froid et de l'y maintenir.

Ainsi, une marge d'arrêt suffisante est obtenue par ces deux moyens de contrôle, l'un étant un système mécanique et l'autre un système de poison chimique.

1.3. SOUS-CRITICITÉ

1.3.1. Sous-criticité suite à un arrêt automatique du réacteur

En fonctionnement en puissance, la réserve d'antiréactivité apportée lors de l'arrêt automatique du réacteur doit être suffisante (marge d'arrêt positive) dans les situations suivantes :

- En cas de refroidissement à 303,3°C (état d'arrêt à chaud), quel que soit l'état initial en puissance, en considérant une grappe coincée hors du cœur ;
- En cas de refroidissement partiel à 260°C, quel que soit l'état initial en puissance en considérant une grappe coincée hors du cœur ;
- En cas de Manque De Tension Généralisé et en cas de perte de source froide ultime sur \square , sans mise en œuvre des moyens d'appoint de bore.

La méthode de calcul des marges d'arrêt ainsi que les incertitudes et pénalités prises en compte sont décrites dans le sous-chapitre 4.3 du Rapport de Sûreté. \square Les marges d'arrêt enveloppes de la gestion, évaluées avec les insertions limites (IL) correspondant au jeu d'hypothèses intermédiaire (voir annexe 15B) ainsi que celles correspondant à l'état final de conception (voir sous-chapitre 15.1) sont présentées au tableau [TAB-4.5.1](#).

\square

1.3.2. Sous-criticité en état d'arrêt

Pour maintenir le cœur à l'état d'arrêt à chaud ou à froid, il est nécessaire de garantir la sous-criticité du cœur dans les états d'arrêt. En états d'arrêt, l'ensemble des grappes de contrôle et d'arrêt étant insérées dans le cœur, la sous-criticité du cœur est assurée via un bilan de réactivité valorisant l'antiréactivité apportée par les grappes et l'anti-réactivité apportée par le bore.

Cependant, des événements peuvent survenir à partir de ces états. Il est donc nécessaire de maintenir une certaine sous-criticité afin de prévenir les conséquences de ces événements.

Les concentrations en bore requises pour respecter les critères de sous-criticité dans les conditions d'arrêt pour rechargement, d'arrêt à froid, d'arrêt à chaud et d'état d'arrêt sûr sont spécifiées au tableau [TAB-4.5.2](#). De plus, les concentrations en bore d'arrêt à chaud et d'arrêt à froid devront garantir une sous-criticité minimum en fonctionnement normal (état initial) de 1000 pcm. \square

\square

Pour le cas particulier du transitoire de dilution (voir section 15.2.2r), le dispositif de protection anti-dilution de l'EPR permet d'arrêter la dilution avant le retour en criticité.

La présence de toutes les grappes dans le cœur dans l'ensemble des états d'arrêt améliore la sûreté du réacteur dans la mesure où elle contribue à diminuer le risque de RIGZ. L'ajout du permissif P9 (coupure automatique de l'alimentation électrique des mécanismes de commande des grappes) permet en effet d'éliminer l'initiateur RIGZ \square (voir section 15.2.3m pour le principe de dimensionnement).

En exploitation, les concentrations en bore requises dans les états d'arrêt seront au minimum les concentrations en bore évaluées sur le principe présenté dans le sous-chapitre 4.5, éventuellement augmentées pour assurer une marge de fonctionnement vis-à-vis de la protection anti-dilution (voir section 15.2.2r). Par ailleurs, les valeurs en exploitation seront différentes des valeurs fournies dans le présent sous-chapitre : elles seront propres à chaque recharge et adaptées en fonction de l'épuisement.

\square

1.3.2.1. □

□

1.3.2.2. □

□

1.3.2.3. □

□

1.3.2.4. □

□

2. DESCRIPTION DES ASPECTS FONCTIONNELS DE LA CONCEPTION DES SYSTÈMES

La conception fonctionnelle du contrôle de la réactivité a des conséquences sur un grand nombre de systèmes. Les principes de dimensionnement spécifiques à ces systèmes reflèteront l'impact de la conception fonctionnelle du contrôle de la réactivité. La liste de ces systèmes est donnée ci-dessous, ainsi que l'impact de la conception fonctionnelle du contrôle de la réactivité sur les principes de dimensionnement correspondants.

Les informations concernant les performances conjuguées des différents systèmes en termes de réactivité sont données ci-après. □

2.1. LE SYSTÈME DE COMMANDE DES GRAPPES DE CONTRÔLE (RGL)

Le système de commande des grappes de contrôle répond aux signaux d'activation qui peuvent être générés par le système de contrôle et de protection du réacteur (voir sous-chapitres 7.3 et 7.4) ou par l'intervention d'un opérateur. Ces signaux d'activation doivent permettre le déplacement des grappes par désaimantation des bobines des mécanismes de commande des grappes (MCDG) (voir section 5.3.4).

Le système de commande des grappes de contrôle permet de rendre le cœur sous-critique en un temps très court, quel que soit le niveau de puissance initial. Pour la plupart des études d'accidents (sauf dans les cas d'un Accident de Perte de Réfrigérant Primaire (APRP) et d'une rupture de tuyauterie vapeur) les grappes de contrôle suffisent pour rejoindre l'état contrôlé.

2.2. LE SYSTÈME DE CONTRÔLE VOLUMÉTRIQUE ET CHIMIQUE (RCV) ET LE SYSTÈME DE BORICATION DE SÉCURITÉ (RBS)

Le RCV répond aux signaux d'activation qui peuvent être générés par le système de commande du réacteur ou par l'intervention d'un opérateur (voir section 9.3.2). Il permet d'ajuster la concentration en bore à la valeur requise dans le cœur, pour qu'il soit critique en puissance, ou sous-critique de la quantité requise, dans les phases d'arrêt.

Le RCV n'étant pas un système classé sûreté, sa fonction quant au contrôle de la réactivité est assurée par le système de borication de sécurité (RBS) en cas d'accident.

Le RBS est actionné sur intervention d'un opérateur, ou de manière automatique notamment sur les signaux ATWS et Haut flux niveau source.

Le système de borication de sécurité permet d'assurer la sous-criticité du cœur dans la phase long terme des événements le requérant. Il est requis pour atteindre l'état d'arrêt sûr pour la plupart des

PCC et pour atteindre l'état contrôlé notamment en cas de rupture de tuyauterie vapeur ou d'éjection de grappe.

2.3. LE SYSTÈME D'INJECTION DE SÉCURITÉ (RIS)

Le RIS répond aux signaux d'activation qui peuvent être générés par le système de protection du réacteur ou par l'intervention d'un opérateur (voir paragraphe 1 du sous-chapitre 6.3).

Entre autres fonctions, il permet d'assurer la sous-criticité du cœur à long terme suite à un APRP et permet également d'atteindre l'état contrôlé et l'état d'arrêt sûr.

2.4. INFORMATIONS CONCERNANT LES PERFORMANCES CUMULÉES DES SYSTÈMES DE RÉACTIVITÉ

L'arrêt automatique du réacteur (AAR) associé au système de borication de sécurité (RBS) garantit la sous-criticité du cœur à l'état contrôlé et à l'état d'arrêt sûr pour la plupart des PCC-2 à 4, à l'exception des APRP pour lesquels le RIS est requis (voir chapitre 15). Pour la plupart des APRP, l'arrêt automatique du réacteur (AAR) associé au système d'injection de sécurité (RIS) est suffisant pour rejoindre l'état contrôlé et l'état d'arrêt sûr. Par ailleurs, en cas de rupture de tuyauterie vapeur et d'éjection de grappe, le système de borication de sécurité est nécessaire pour atteindre l'état contrôlé. Il faut remarquer que les capacités de borication du système de contrôle volumétrique et chimique (RCV) ne sont pas prises en considération dans l'analyse des PCC (voir chapitre 15).

Les informations relatives aux performances du RCV sont présentées dans la section 9.3.2 du Rapport de Sûreté. Les possibilités de dilution intempestive d'acide borique due au RCV sont étudiées dans des études dédiées (voir sous-chapitre 15.2). Pour l'évaluation des autres événements, un fonctionnement initial correct du RCV est pris comme condition initiale, compte tenu de la conception et des protections mises en place au niveau du RCV.

3. ÉVALUATION DE LA CONCEPTION

L'évaluation individuelle de la conception de chaque système impacté par la conception fonctionnelle du contrôle de la réactivité est traitée dans le chapitre dédié à chacun de ces systèmes.

Le seul point évoqué ici est l'évaluation des performances cumulées des différents systèmes.

L'évaluation des PCC 2 à 4, qui suppose l'activation concomitante du système de commande des grappes de contrôle et du système de borication de sécurité par le système de protection du réacteur et par une intervention de l'opérateur, est présentée dans le chapitre traitant des études d'accidents (voir chapitre 15). Les signaux d'arrêt automatique du réacteur pour ces événements sont générés à partir d'équipements redondants (capteurs, train logique) et ils activent des moyens redondants de contrôle de la réactivité. L'arrêt automatique du réacteur est obtenu par le déclenchement des disjoncteurs d'arrêt d'urgence redondants qui coupe l'alimentation électrique des mécanismes de commande de grappes et provoque la chute des 89 grappes de contrôle et d'arrêt par gravité. Suite à l'arrêt automatique du réacteur, le système de borication de sécurité est démarré conformément à la procédure accidentelle. Il est constitué (voir sous-chapitre 6.7) de deux trains .

Pour l'évaluation du scénario d'APRP, on suppose l'activation concomitante du système de commande des grappes de contrôle et du système d'injection de sécurité par le système de protection du réacteur. Les signaux d'injection de sécurité sont générés par des capteurs et des trains logiques redondants. Le système d'injection de sécurité est constitué de quatre trains indépendants strictement séparés qui sont affectés aux boucles du fluide primaire du réacteur et situés dans les quatre divisions de sûreté.

Il faut souligner que le système de borication de sécurité se déclenche automatiquement en cas d'accident sans arrêt automatique du réacteur (ATWS), afin de garantir la sous-criticité du cœur, en tant qu'alternative au système de commande des grappes de contrôle. Des mesures sont prises pour limiter les conséquences des ATWS (voir sous-chapitre 19.1).



RAPPORT DE SURETE

— DE FLAMANVILLE 3 —

Version Publique

Edition DEMANDE DE MISE EN SERVICE

CHAPITRE 4

SECTION 5

PAGE 8/10

CENTRALES NUCLÉAIRES

Palier EPR

LISTE DES RÉFÉRENCES

TAB-4.5.1 PARAMÈTRES DE CONCEPTION NUCLÉAIRE **(MARGES D'ARRÊT)**

□

TAB-4.5.2 PARAMÈTRES DE CONCEPTION NUCLÉAIRE **(CONCENTRATIONS EN BORE)**

□

PARAMÈTRES DE CONCEPTION NUCLÉAIRE (CONCENTRATIONS EN BORE) (SUITE)

□



RAPPORT DE SURETE

— DE FLAMANVILLE 3 —

Version Publique

Edition DEMANDE DE MISE EN SERVICE

CHAPITRE

4

SECTION

ANNEXE4

PAGE

1/4

CENTRALES NUCLÉAIRES

Palier EPR

SOMMAIRE

.4.ANNEXE4	CODES DE CALCUL UTILISÉS DANS LE CHAPITRE 4	2
1.	□	2
2.	□	2
3.	□	2
4.	□	2
5.	□	2
6.	□	2
7.	□	2
8.	□	3
9.	□	3
LISTE DES RÉFÉRENCES.		4

.4.ANNEXE4 CODES DE CALCUL UTILISÉS DANS LE CHAPITRE 4

Section du chapitre 4	Codes
4.3	<input type="checkbox"/>
4.3 / 4.4.3.1.8 / 4.4.3.2.4 / 4.5	<input type="checkbox"/>
4.3.8.2	<input type="checkbox"/>
4.4	<input type="checkbox"/>
4.4.1.4	<input type="checkbox"/>
4.3.9	<input type="checkbox"/>
4.3.7	<input type="checkbox"/>
4.3.8.2	<input type="checkbox"/>
4.3.8.1	<input type="checkbox"/>

1.

2.

3.

4.

5.

6.

7.



RAPPORT DE SURETE
— DE FLAMANVILLE 3 —

CHAPITRE 4

CENTRALES NUCLÉAIRES

Version Publique

SECTION ANNEXE4

Palier EPR

Edition DEMANDE DE MISE EN SERVICE

PAGE

3/4

8.

9.

LISTE DES RÉFÉRENCES**[1] EPD DC 349 révision I**Note de synthèse de qualification de **[]****[2] SERMA/LEPP/RT/01.3007/A (note CEA)**

Qualification de la puissance résiduelle de combustible REP

[3] EPD DC 333 révision CNote de synthèse et de qualification du code **[]****[4] NEPD-F DC 10160 révision B****[]** Physical Validation synthesis report**[5] NFEPD DC 49 révision C**Summary report on qualification of **[]****[6] EPD DC 351 révision A**Note de synthèse de qualification du code **[]** pour les calculs de criticité**[7] NFEPD DC 42 révision B**Note de synthèse de qualification du code **[]** pour les calculs de transport neutron, gamma, électron**[8] EPDS DC 94 révision E****[]** Note de synthèse de qualification**[9] NFPSD DC 85 révision E****[]** code synthetic qualification assessment**[10] NEPD-F DC 65 révision F**Applicabilité de la qualification de **[]** à l'EPR FA3