

**DIRECTIVES TECHNIQUES POUR LA CONCEPTION ET LA
CONSTRUCTION DE LA PROCHAINE GENERATION DE REACTEURS
NUCLEAIRES A EAU SOUS PRESSION**

**Adoptées pendant les réunions plénières
du GPR et des experts allemands les 19 et 26 octobre 2000**

**Version française
(mars 2004)**

INTRODUCTION ET CHAMP D'APPLICATION	1
A - PRINCIPES DE SURETE	2
A.1 – APPROCHE GENERALE DE SURETE.....	2
A.1.1 – Objectifs généraux de sûreté.....	2
A.1.2 – Le principe de "défense en profondeur".....	3
A.1.3 – Stratégie générale relative aux accidents graves.....	4
A.1.4 – Démonstration de sûreté.....	5
A.2 - PRINCIPES GENERAUX DE SURETE.....	7
A.2.1 – Comportement du réacteur en régime transitoire.....	7
A.2.2 - Redondance et diversification dans les systèmes de sûreté.....	7
A.2.3 - Interface homme-machine.....	8
A.2.4 - Protection contre les agressions internes.....	9
A.2.5 - Protection contre les agressions externes.....	9
A.2.6 - Utilisation des études probabilistes de sûreté.....	10
A.2.7 - Radioprotection des travailleurs et des personnes du public.....	11
B – CARACTERISTIQUES DE SÛRETE DE BASE	12
B.1 - CONCEPTION DES BARRIERES.....	12
B.1.1 – Conception du cœur et du gainage du combustible.....	12
B.1.2 - Circuit primaire.....	13
B.1.3 – Exigences relatives aux tuyauteries secondaires principales.....	14
B.1.4 - Fonction de confinement.....	15
B.2 - FONCTIONS ET SYSTEMES DE SURETE.....	18
B.2.1 – Classement des fonctions, barrières, structures et systèmes de sûreté.....	18
B.2.2 - Exigences pour les équipements de sûreté.....	21
B.2.3 - Exigences applicables à des fonctions de sûreté spécifiques.....	22
B.2.4 - Exigences applicables aux systèmes de sûreté supports.....	28
C – PREVENTION DES ACCIDENTS ET CARACTERISTIQUES DE SURETE DE LA TRANCHE.....	30
C.1 - REDUCTION DES FREQUENCES DES EVENEMENTS INITIATEURS.....	30
C.2 - REDONDANCE ET DIVERSIFICATION.....	30
C.2.1 - Critère de défaillance unique et maintenance préventive.....	30
C.2.2 – Etude probabiliste de sûreté et diversification.....	32
C.3 - FACTEURS HUMAINS.....	34
C.4 - RADIOPROTECTION DES TRAVAILLEURS ET DES PERSONNES DU PUBLIC.....	35
C.4.1 - Radioprotection en exploitation normale.....	35
C.4.2 – Effluents radioactifs, réduction des déchets et démantèlement.....	36
D - MAITRISE DES TRANSITOIRES, INCIDENTS ET ACCIDENTS DE REFERENCE.....	38
D.1 – LISTE DES TRANSITOIRES, INCIDENTS ET ACCIDENTS DE REFERENCE.....	38
D.2 – REGLES D'ANALYSE DE SURETE ET CRITERES D'ACCEPTATION.....	41
D.2.1 - Règles d'analyse de sûreté.....	42

D.2.2 - Critères d'acceptation.....	43
D.2.3 - Utilisation de codes de calcul.....	44
D.2.4 - Conséquences radiologiques.....	44
E – MAITRISE DES CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT AVEC DEFAILLANCES MULTIPLES ET DES ACCIDENTS AVEC FUSION DU COEUR.....	46
E.1 - CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT AVEC DEFAILLANCES MULTIPLES	46
E.1.1 – Prise en compte dans la démonstration de sûreté.....	46
E.1.2 - Analyse déterministe des conditions de fonctionnement RRC-A.....	46
E.1.2.3 - REGLES D'ANALYSE DES ACCIDENTS ET CRITERES D'ACCEPTATION	47
E.1.3 - Etude probabiliste des conditions de fonctionnement avec défaillances multiples.....	48
E.2 - DISPOSITIONS DE PROTECTION CONTRE LES ACCIDENTS AVEC FUSION DU CŒUR.....	49
E.2.1 - Objectifs de sûreté.....	49
E.2.2 – Élimination pratique des séquences conduisant à des rejets précoces importants	50
E.2.3 - Limitation des conséquences des scénarios de fusion du cœur à basse pression.....	55
E.2.4 - Démonstration de sûreté.....	58
F - PROTECTION CONTRE LES AGRESSIONS.....	60
F.1 - PROTECTION CONTRE LES AGRESSIONS INTERNES	60
F.1.1 – Exigences générales.....	60
F.1.2 - Exigences pour la conception des dispositions de protection contre les agressions internes.....	60
F.2 - PROTECTION CONTRE LES AGRESSIONS EXTERNES	64
F.2.1 - Évènements à considérer	64
F.2.2 - Exigences pour la conception des dispositions de protection contre des agressions externes spécifiques...	65
G - EXIGENCES DE CONCEPTION DES SYSTEMES ET EFFICACITE DES FONCTIONS DE SURETE ...	71
G.1- CONCEPTION DU SYSTEME DE REFROIDISSEMENT DE LA PISCINE DU COMBUSTIBLE USE	71
G.2 - EFFICACITE DE L'ETANCHEITE DE L'ENCEINTE DE CONFINEMENT.....	72
G.3 - CONCEPTION DU CONTROLE-COMMANDE	73
G.4 – UTILISATION DE CODES TECHNIQUES	75

INTRODUCTION ET CHAMP D'APPLICATION

Ces directives techniques présentent l'opinion du Groupe Permanent chargé des Réacteurs nucléaires (GPR) concernant la philosophie et l'approche de sûreté ainsi que les exigences générales de sûreté à appliquer pour la conception et la construction de la prochaine génération de tranches nucléaires de type REP (réacteurs nucléaires à eau pressurisée), en supposant que la construction des premières tranches de cette génération démarre au début du XXI^e siècle. Ces directives techniques sont fondées sur un travail en commun de l'Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire français (IPSN) et de la Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit allemande (GRS). De plus, ces directives techniques ont été discutées de manière approfondie avec les membres de la commission de sûreté allemande RSK (Reaktor Sicherheitskommission) jusqu'à la fin de 1998 et avec des experts allemands au-delà de cette date.

Le contexte de ces directives techniques doit être clairement compris. Face à la situation présente de l'énergie nucléaire dans le monde, les différents concepteurs de chaudières nucléaires développent de nouveaux produits, tous affichant leur intention d'obtenir un niveau de sûreté accru, par différents moyens. Le GPR estime que, pour l'exploitation d'une nouvelle série de tranches nucléaires au début du prochain siècle, la bonne voie est de déduire la conception de ces tranches de la conception des tranches existantes de manière "évolutionnaire", en prenant en compte l'expérience d'exploitation et les études approfondies menées pour ces tranches. Néanmoins, l'introduction de dispositions innovantes doit aussi être considérée dans le cadre de la conception de la nouvelle génération de tranches, en particulier pour prévenir et maîtriser les accidents graves.

Le GPR souligne ici qu'une amélioration significative de la sûreté de la prochaine génération de tranches nucléaires est nécessaire au stade de la conception, par rapport aux tranches existantes. Si la recherche d'amélioration est une préoccupation permanente dans le domaine de la sûreté, la nécessité d'un saut important au stade de la conception résulte clairement d'une meilleure considération des problèmes liés aux accidents graves, non seulement à court terme mais aussi à long terme, dus à la contamination possible de surfaces étendues par des radionucléides à longue vie tels que le césium ; pour les tranches existantes, des améliorations sont mises en place sur une base pragmatique en tenant compte des limitations de leur conception, dans le cadre du processus normal de réexamen périodique de la sûreté des tranches.

Le GPR croit qu'un saut significatif au stade de la conception est possible dans une voie "évolutionnaire" si l'attention nécessaire est portée aux leçons tirées de l'expérience d'exploitation et des études probabilistes réalisées pour les tranches existantes aussi bien qu'aux résultats des recherches en sûreté, notamment sur les accidents graves, avec l'objectif d'obtenir une réduction des probabilités d'occurrence calculées et des rejets accidentels de matières radioactives calculés. Les travaux de recherche et développement réalisés au stade de la conception (puis en cours d'exploitation) contribueront également à l'amélioration de la sûreté ou à la validation du comportement des systèmes et des tranches.

A - PRINCIPES DE SURETE

A.1 – Approche générale de sûreté

L'amélioration significative de la sûreté, par rapport aux tranches existantes, de la prochaine génération de tranches nucléaires est précisée par les objectifs présentés ci-après.

A.1.1 – Objectifs généraux de sûreté

- a) Pour l'exploitation normale et les incidents d'exploitation, un objectif est de réduire les doses individuelles et collectives reçues par les travailleurs, qui sont fortement liées aux activités de maintenance et d'inspection en service. La réduction de l'exposition des travailleurs doit être recherchée par un processus d'optimisation tenant compte des données acquises par l'expérience d'exploitation. Il convient aussi de considérer la limitation des rejets radioactifs dans le cadre des contraintes de doses correspondantes, ainsi que la réduction des quantités et des activités des déchets radioactifs.
- b) Un autre objectif est de réduire le nombre des incidents significatifs, ce qui implique de rechercher des améliorations des équipements et systèmes utilisés en fonctionnement normal, dans le but de réduire les fréquences des transitoires et des incidents et donc de limiter les possibilités d'apparition de situations accidentelles à partir de tels événements.
- c) Une réduction significative de la fréquence globale de fusion du cœur doit être obtenue pour les tranches nucléaires de la prochaine génération. La mise en œuvre d'améliorations de la défense en profondeur de ces tranches devrait conduire à l'obtention d'une fréquence globale de fusion du cœur inférieure à 10^{-5} par année.réacteur, en tenant compte des incertitudes et de tous les types de défaillances et d'agressions.
- d) De plus, un objectif important est d'obtenir une réduction significative des rejets radioactifs pouvant résulter de toutes les situations d'accident concevables, y compris les accidents avec fusion du cœur.

Pour les situations d'accidents sans fusion du cœur, il ne doit pas y avoir de nécessité de mesures de protection des populations vivant dans le voisinage de la centrale endommagée (pas d'évacuation, pas de mise à l'abri).

Les accidents avec fusion du cœur qui conduiraient à des rejets précoces importants doivent être "pratiquement éliminés" : s'ils ne peuvent pas être considérés comme physiquement impossibles, des dispositions de conception doivent être prises pour les exclure. Cet objectif concerne en particulier les accidents avec fusion du cœur en pression.

Les séquences avec fusion du cœur à basse pression doivent être traitées de telle sorte que les rejets maximaux concevables associés ne nécessitent que des mesures de protection des populations très limitées en termes d'étendue et de durée. Ceci se traduirait par l'absence de

relogement permanent, l'absence de nécessité d'évacuation d'urgence au-delà du voisinage immédiat de la tranche, une mise à l'abri limitée, l'absence de restrictions à long terme de la consommation des produits alimentaires.

A.1.2 – Le principe de "défense en profondeur"

Le principe de "défense en profondeur" reste le principe fondamental de sûreté pour les tranches nucléaires de la prochaine génération, avec la mise en œuvre de plusieurs niveaux de protection incluant des barrières successives contre le rejet de substances radioactives dans l'environnement.

Ce principe doit être utilisé pour démontrer que les trois fonctions fondamentales de sûreté - maîtrise de la réactivité, refroidissement du combustible et confinement des substances radioactives - sont correctement assurées. Le but est d'assurer la protection des personnes du public et des travailleurs. Ceci inclut aussi bien la prévention des accidents que la limitation de leurs conséquences.

Pour la prochaine génération de tranches nucléaires, les objectifs généraux de sûreté énoncés dans la section **A.1.1** impliquent de renforcer la "défense en profondeur" de ces tranches par rapport aux tranches existantes ; ces objectifs demandent notamment de considérer de façon plus étendue les possibilités de défaillances multiples et de recourir à des moyens diversifiés pour accomplir les trois fonctions fondamentales de sûreté mentionnées ci-dessus ; ils demandent également une amélioration substantielle de la fonction de confinement, en considérant en particulier les différentes défaillances possibles de cette fonction pour les situations avec fusion du cœur. Les résultats de l'expérience d'exploitation de même que les résultats d'études approfondies telles que les études probabilistes de sûreté réalisées pour les réacteurs à eau pressurisée et les progrès dans la connaissance des phénomènes physiques qui peuvent intervenir au cours du développement de situations accidentelles, en particulier des situations avec fusion du cœur, doivent être pris en compte.

Il est souligné qu'une réduction des fréquences d'occurrence des accidents (y compris des accidents avec fusion du cœur) doit être obtenue en réduisant les fréquences d'occurrence des événements initiateurs et en améliorant encore la disponibilité des systèmes de sûreté.

En particulier, une attention spécifique doit être accordée au stade de la conception aux états d'arrêt et notamment aux modes opératoires spécifiques nécessités par les actions réalisées dans les périodes d'arrêt.

Il est également souligné que la qualité de la conception, de la fabrication, de la construction et de l'exploitation est essentielle pour la sûreté dans le cadre du premier niveau de la défense en profondeur. La qualité doit être obtenue et démontrée notamment par un ensemble adéquat d'exigences pour la conception, la fabrication, la construction, la mise en service et l'exploitation aussi bien que par l'assurance de la qualité.

De plus, il convient de considérer de façon appropriée au stade de la conception les possibilités d'inspection et de test des équipements de même que les possibilités de remplacement de certains équipements, en considérant que les activités de maintenance et de test sont essentielles pour maintenir la sûreté de la tranche tout au long de son exploitation.

A.1.3 – Stratégie générale relative aux accidents graves

Les objectifs généraux énoncés dans la section **A.1.1** ont les implications générales suivantes pour ce qui concerne les accidents graves.

a) "Élimination pratique" des situations accidentelles qui conduiraient à des rejets précoces importants

- Les séquences accidentelles avec bipasse du confinement (par les générateurs de vapeur ou par des circuits connectés au système primaire qui sortent de l'enceinte de confinement) doivent être "pratiquement éliminées" par des dispositions de conception (telles qu'une pression de conception adéquate des tuyauteries) et des dispositions d'exploitation dans le but d'assurer un isolement fiable et aussi de prévenir les défaillances.
- Une attention particulière doit être accordée aux situations à l'arrêt où l'enceinte de confinement est ouverte.
- La prévention par des dispositions de conception des accidents de réactivité résultant d'une introduction rapide d'eau froide ou insuffisamment borée doit être telle qu'ils puissent être "exclus".
- Les surpressions du circuit primaire doivent aussi être évitées autant que nécessaire par des dispositions de conception et des procédures d'exploitation de manière à contribuer en particulier à "l'exclusion" de la rupture de la cuve du réacteur.
- Les situations de fusion du cœur à haute pression doivent être évitées par des dispositions de conception (telles qu'une diversification et des actions automatiques) pour les systèmes de sûreté du côté secondaire et si nécessaire pour les systèmes de maîtrise de la réactivité et de "gavé ouvert" primaire. Transformer avec une haute fiabilité¹ les séquences avec fusion du cœur à haute pression en séquences avec fusion du cœur à basse pression doit être un objectif de conception de telle sorte que les situations de fusion du cœur à haute pression puissent être "exclues". La dépressurisation doit être telle que l'installation puisse faire face aux chargements résultant de l'éjection du cœur fondu dans l'atmosphère de l'enceinte de confinement ("échauffement direct de l'enceinte") et aux chargements sur les supportages de la cuve du réacteur et les structures du puits de cuve.
- Les détonations globales d'hydrogène ainsi que les explosions de vapeur en cuve et hors cuve mettant en danger l'intégrité de l'enceinte de confinement doivent être "pratiquement éliminées".

b) Limitation des conséquences des situations de fusion du cœur à basse pression

¹ A titre d'orientation, les équipements utilisés pour dépressuriser le circuit primaire doivent être aussi fiables que le système de vannes de décharge utilisé pour empêcher une surpression.

- Pour ce qui concerne les fuites de l'enceinte de confinement, il ne doit pas y avoir de chemin de fuite directe de l'enceinte de confinement à l'extérieur. Les tuyauteries susceptibles de transporter des substances radioactives à l'extérieur de l'enceinte de confinement doivent conduire à des bâtiments périphériques présentant des capacités de confinement adéquates. Des améliorations de la surveillance permanente de l'étanchéité de l'enceinte de confinement doivent être recherchées. Les traversées de l'enceinte résistant à la pression doivent supporter les chargements résultant des séquences avec fusion du cœur.
- Il est nécessaire de considérer de façon appropriée les différents aspects d'un système d'aspersion à l'intérieur de l'enceinte de confinement pour les situations d'accident grave. Un tel système permet de réduire à la fois la pression et les concentrations d'aérosols radioactifs dans l'enceinte de confinement ; cependant un système d'aspersion réduit l'inertage par la vapeur et accroît la vitesse de flamme d'une combustion d'hydrogène.
- La chaleur résiduelle doit être extraite de l'enceinte de confinement sans dispositif d'éventage ; pour cette fonction, un système ultime d'évacuation de la puissance résiduelle doit être installé.
- Pour ce qui concerne la possible formation de mélanges gazeux combustibles, l'enceinte de confinement doit être conçue pour résister à la déflagration globale de la quantité maximale d'hydrogène qui pourrait être contenue dans l'enceinte au cours des accidents avec fusion du cœur et aussi pour résister à une déflagration rapide locale représentative. En outre, des dispositions doivent être prises à l'égard des détonations locales et des possibilités de séquences avec transition déflagration-détonation (DDT) qui pourraient endommager l'enceinte et ses structures internes. La limitation des concentrations de gaz combustibles par la conception des structures internes et l'utilisation de recombineurs catalytiques doivent notamment être considérées.
- La pénétration du radier de l'enceinte de confinement par un "corium" doit être évitée, étant donné que ce phénomène pourrait conduire à des rejets significatifs et à une contamination durable des nappes phréatiques et du sous-sol. De plus, des dispositions adéquates doivent être mises en œuvre pour empêcher les fuites d'eau et de gaz contaminés dans le sous-sol à travers des fissures dans le radier.

A.1.4 – Démonstration de sûreté

La démonstration de sûreté pour les tranches nucléaires de la prochaine génération doit être faite de manière déterministe, complétée par des méthodes probabilistes et des travaux de recherche et de développement appropriés.

Dans cette démonstration, les événements initiateurs uniques doivent être "exclus" ou "traités" - c'est-à-dire que leurs conséquences sont examinées de manière déterministe. Des événements initiateurs uniques ne peuvent être "exclus" que si des dispositions suffisantes de conception et d'exploitation sont prises de telle sorte qu'il puisse être clairement démontré qu'il est possible "d'éliminer pratiquement" ce type de situations accidentelles ; par exemple, la rupture de la cuve du réacteur et celle d'autres gros composants (comme la partie secondaire des générateurs de vapeur ou le pressuriseur) peut être examinée de cette façon.

Les autres événements initiateurs uniques peuvent être regroupés de manière à définir un nombre limité de transitoires, d'incidents et d'accidents de référence ; ces transitoires, incidents et accidents de référence peuvent être répartis en catégories selon les fréquences estimées des groupes d'événements correspondants. Pour les différents transitoires, incidents et accidents de référence, des critères techniques appropriés doivent être respectés avec des hypothèses conservatives incluant des défaillances aggravantes. Pour les différents transitoires, incidents et accidents de référence significatifs du point de vue radiologique, il doit être vérifié, en supposant que les critères techniques correspondants sont respectés, que les conséquences radiologiques sont tolérables et cohérentes avec les objectifs généraux de sûreté mentionnés dans la section **A.1.1** pour les situations accidentelles sans fusion du cœur. Des conséquences radiologiques plus importantes peuvent être jugées tolérables pour des catégories de fréquence estimée plus faible.

En complément aux événements initiateurs uniques, la démonstration de sûreté doit analyser les situations avec défaillances multiples de même que les agressions internes et externes. La démonstration de sûreté relative à ces situations et agressions peut être supportée par des évaluations probabilistes. Les liens possibles entre agressions internes et externes et événements initiateurs uniques doivent être également considérés.

Une étude probabiliste de sûreté doit être réalisée en commençant dès le stade de la conception et en incluant au moins les événements internes ; cette étude probabiliste de sûreté indiquerait les fréquences des séquences de fusion du cœur avec un aperçu des conséquences possibles des différents types de situations avec fusion du cœur sur la fonction de confinement.

Cependant, "l'élimination pratique" des situations accidentelles qui pourraient conduire à des rejets précoces importants est une question de jugement et chaque type de séquences doit être examiné séparément. Leur "élimination pratique" peut être démontrée par des considérations déterministes et/ou probabilistes, en tenant compte des incertitudes dues aux connaissances limitées de certains phénomènes physiques. Il est souligné que "l'élimination pratique" ne peut pas être démontrée par le respect d'une "valeur de coupure" probabiliste générique.

Pour ce qui concerne les accidents avec fusion du cœur à basse pression, étant donné le large éventail de conditions accidentelles possibles dans les situations d'accidents graves, le respect des objectifs généraux de sûreté énoncés dans la section **A.1.1** doit être démontré par le calcul des conséquences radiologiques de différentes séquences représentatives qui doivent être précisément définies en fonction de la conception de la tranche. Pour l'évaluation des résultats, les niveaux d'intervention proposés par la publication 63 de la CIPR (pour l'évacuation et le relogement) et les limites de l'Union Européenne (pour la commercialisation des aliments) peuvent être utilisés comme références.

Il est souligné, que d'une manière générale, pour les situations incidentelles et accidentelles, y compris les situations avec fusion du cœur, les calculs de conséquences radiologiques doivent traiter des conséquences à court et à long terme, en considérant les différentes voies de transfert de matières radioactives à l'environnement (air, eaux de surface, nappes phréatiques) et aux hommes (irradiation par le panache et par le sol, incorporation de radionucléides par ingestion et inhalation). La dispersion atmosphérique et les dépôts sur la végétation, le sol et les autres surfaces doivent notamment être

déterminés. L'étude des expositions de groupes critiques doit prendre en compte des hypothèses et des paramètres réalistes en particulier pour les habitudes de vie, les conditions d'exposition, les temps d'intégration, les conditions météorologiques et le transfert des radionucléides dans l'environnement.

A.2 - Principes généraux de sûreté

A.2.1 – Comportement du réacteur en régime transitoire

En règle générale, la conception de la tranche doit être telle que le comportement intrinsèque du réacteur soit stable (par exemple coefficient modérateur négatif).

Des améliorations peuvent être réalisées en rendant le comportement de la tranche moins sensible aux erreurs des opérateurs et aux défaillances des systèmes d'exploitation, par exemple par un contrôle automatique approprié et par la mise en place de capacités de refroidissement suffisamment grandes dans les systèmes primaire et secondaire et dans les systèmes d'appoint d'eau au primaire et au secondaire. Des périodes de grâce adéquates doivent être obtenues pour les actions nécessaires des opérateurs.

Plus précisément, la prévention des erreurs humaines et une moindre sensibilité à ces erreurs doivent être recherchées par un accroissement des marges dans les bases de conception, par le recours à des systèmes passifs ou des systèmes présentant des caractéristiques passives accrues, par la simplification de la conception et par la limitation des interactions entre systèmes, tout en prenant garde à ne pas négliger les avantages possibles d'une redondance fonctionnelle, par une automatisation plus étendue des systèmes de sûreté pour des situations spécifiques et par des améliorations de l'interface homme-machine de manière à fournir aux opérateurs des délais de réaction supplémentaires et des informations fiables pour diagnostiquer le comportement réel de la tranche.

La mise en service non nécessaire de systèmes de sûreté doit être évitée autant qu'il est possible. Pour éviter de telles actions, l'introduction de fonctions de limitation appropriées peut être judicieuse, c'est-à-dire des fonctions de maîtrise supplémentaires qui agissent quand les systèmes de régulation d'exploitation ne sont pas capables de garder les variables contrôlées à l'intérieur des limites spécifiées pour le fonctionnement normal. Des marges suffisantes doivent être mises en place par rapport aux limites de sûreté, en tenant compte à la fois des incertitudes de mesure et des comportements anormaux de la tranche dus à des perturbations mineures ou à des erreurs des opérateurs.

A.2.2 - Redondance et diversification dans les systèmes de sûreté

Pour les événements qui ne sont pas maîtrisés par les systèmes d'exploitation et/ou par les fonctions de limitation, des systèmes de protection et sauvegarde sont nécessaires pour ramener et maintenir le réacteur dans un état sûr en termes de sous-criticité, de refroidissement du cœur et de confinement des substances radioactives. La fiabilité de ces systèmes doit être cohérente avec l'objectif général de

réduction des fréquences d'occurrence des accidents, en tenant compte des fréquences estimées des événements initiateurs et des durées des actions correspondantes de ces systèmes.

Cette fiabilité doit être obtenue par une combinaison adéquate de redondance et de diversification. Une attention adéquate doit être portée au fait que les possibilités de défaillances de mode commun limitent les possibilités de réduction des indisponibilités en ajoutant des trains identiques (sur ce point, il est souligné qu'il n'est probablement pas possible de démontrer que l'indisponibilité d'un système de sûreté redondant constitué de trains identiques est inférieure à 10^{-4} par demande), et au fait que la diversification peut conduire à des systèmes plus complexes et à des difficultés de maintenance ; de plus, une attention appropriée doit être portée aux systèmes supports lors de l'évaluation des bénéfices liés à la mise en place d'équipements et de systèmes diversifiés.

Une attention particulière doit être portée à la réduction des possibilités de défaillances de cause commune. Séparation physique et séparation géographique doivent être mises en œuvre autant qu'il est possible. Les fonctions de support (énergie, contrôle, refroidissement, etc.) doivent aussi être le plus possible indépendantes. Un accent tout particulier doit être mis sur la redondance et la diversification des sources électriques. De plus, des dispositions (incluant une diversification matérielle et logicielle) doivent être mises en œuvre au niveau de l'architecture générale du contrôle-commande pour limiter les défaillances de cause commune d'origine logicielle.

A.2.3 - Interface homme-machine

Une attention appropriée doit être portée aux facteurs humains au stade de la conception, en tenant compte des aspects liés au fonctionnement normal, aux tests et à la maintenance, avec un accent tout particulier sur l'expérience d'exploitation.

Le but général est de tirer avantage des capacités humaines, tout en minimisant les possibilités d'erreurs humaines et en rendant la tranche moins sensible à ces erreurs (voir la section **A.2.1**). Une attention appropriée doit être portée à simplifier l'exploitation, à minimiser les actions humaines nécessaires pour assurer les fonctions de sûreté, à prendre des dispositions permettant une bonne capacité de maintenance, de tests et un suivi fiable de la disponibilité des systèmes de sûreté.

Un programme complet d'ingénierie des facteurs humains doit être mis en œuvre. Ce programme doit aussi couvrir les activités de maintenance et de test de manière à assurer la cohérence et la traçabilité des questions relatives aux facteurs humains et des choix de conception dans une approche des facteurs humains bien structurée et suivant l'état de l'art. Ce programme d'ingénierie des facteurs humains devrait être mis en œuvre sous la conduite d'une équipe spécifique incluant des experts des facteurs humains.

Le développement d'interfaces homme-machine adéquates doit être réalisé dans tous les endroits où des hommes interagissent avec les équipements techniques, en prenant en considération l'organisation des équipes. Outre l'exploitation en salle de conduite, ceci inclut les tests, les réparations et la maintenance.

Réduire les erreurs des opérateurs et rendre la tranche moins sensible à ces erreurs peut être réalisé en utilisant des principes de conception ergonomiques appropriés et en assurant des délais de

réaction suffisamment longs pour les actions des opérateurs. Le délai nécessaire dépend de la complexité de la situation à diagnostiquer et des actions à mener.

Une information suffisante et appropriée doit être fournie aux opérateurs pour une compréhension claire de l'état réel de la tranche, en incluant les conditions d'accident grave, et pour une évaluation claire des effets de leurs interventions.

A.2.4 - Protection contre les agressions internes

Les agressions internes peuvent être définies comme des événements dont l'origine est interne à la tranche pouvant entraîner des conditions hostiles ou des dommages aux équipements nécessaires pour remplir les trois fonctions fondamentales de sûreté mentionnées dans la section **A.1.2**. Elles incluent notamment les défaillances de tuyauteries, de cuves, de réservoirs, de pompes, de vannes de même que les inondations, les incendies, les explosions, les projectiles et les chutes de charges.

Le principe de « défense en profondeur » doit être appliqué à la protection contre les agressions internes de manière à limiter la vraisemblance et les conséquences de telles agressions par la mise en place de dispositions de prévention, de surveillance et de limitation des conséquences, en cohérence avec les dispositions prises pour les événements internes.

En relation avec la définition des trois fonctions fondamentales de sûreté, non seulement les bâtiments contenant des systèmes nécessaires pour atteindre et maintenir un état d'arrêt sûr, mais aussi les bâtiments abritant des systèmes contenant des matières radioactives doivent être considérés.

Il convient de souligner le fait que l'occurrence d'agressions internes durant les états d'arrêt doit être examinée précisément, en tenant compte des configurations spécifiques des équipements et des systèmes de sûreté qui pourraient être nécessaires dans ces états.

Pour la vérification de la conception et la démonstration de sûreté relatives aux agressions internes, une attention particulière doit être portée à évaluer l'exhaustivité des causes possibles de telles agressions en y incluant par exemple des erreurs de lignage ou des interférences électromagnétiques, de même que les possibilités d'agressions internes résultant d'autres événements internes ou externes à la tranche ou pouvant affecter les trois fonctions fondamentales de sûreté dans plus d'un des niveaux successifs de défense en profondeur.

A.2.5 - Protection contre les agressions externes

Les agressions externes peuvent être définies comme des événements naturels ou liés aux activités humaines ayant leur origine à l'extérieur de la tranche et pouvant affecter négativement la sûreté de celle-ci. Elles incluent notamment les séismes, les chutes d'avion et les explosions.

Les agressions externes peuvent affecter consécutivement ou simultanément différentes lignes de défense des tranches et elles dépendent des sites. De ce fait, une attention appropriée doit être portée au choix des sites dans le but de ne pas imposer des exigences excessives à la conception des tranches correspondantes. En règle générale, des dispositions de conception doivent être prises à

l'égard des agressions externes de manière cohérente avec celles prises pour les événements internes et les agressions internes ; c'est-à-dire que les agressions externes ne doivent pas constituer une part importante du risque associé aux tranches nucléaires de la prochaine génération.

L'objectif général des dispositions de conception est de garantir que les fonctions de sûreté des systèmes et des équipements qui sont nécessaires pour amener la tranche dans un état d'arrêt sûr et pour éviter et limiter les rejets radioactifs ne sont pas affectées de manière inadmissible par une agression externe. Cependant, comme les agressions externes dépendent des sites, il n'est pas nécessaire de tenir compte de toutes ces agressions dans une conception standardisée ; les agressions externes telles que les inondations externes, la sécheresse, la formation de glace et les gaz toxiques, corrosifs ou combustibles, peuvent être traitées uniquement pour une tranche particulière, selon le site.

Les équipements dont le fonctionnement est nécessaire durant les agressions externes doivent être qualifiés pour la plage de paramètres supposée survenir au cours de tels événements.

A.2.6 - Utilisation des études probabilistes de sûreté

Comme déjà indiqué dans la section **A.1.4**, une étude probabiliste de sûreté doit être effectuée avec les objectifs suivants au stade de la conception : conforter le choix des options de conception, en y incluant la redondance et la diversification des systèmes de sûreté, assurer un concept de sûreté équilibré et évaluer les écarts par rapport aux pratiques actuelles en matière de sûreté, apprécier l'amélioration du niveau de sûreté en comparaison des tranches existantes.

L'évaluation des résultats des études probabilistes de sûreté par rapport à des objectifs probabilistes quantitatifs peut fournir des indications utiles. Mais, en règle générale, les objectifs probabilistes quantitatifs ne doivent pas être considérés comme des exigences ; ils sont essentiellement destinés à fournir des valeurs d'orientation pour vérifier et évaluer la conception.

Concernant la méthode générale, l'étude probabiliste de sûreté peut être conduite en deux étapes ou plus : une étude simplifiée au stade de la conception et des études plus complètes pendant les phases d'ingénierie, quand des informations plus précises sur la conception deviennent disponibles.

L'étude simplifiée, incluant au moins les événements internes, doit présenter une évaluation préliminaire de la fréquence d'endommagement du cœur et les séquences correspondantes ; en outre, le concepteur doit distinguer les différents types de séquences de fusion du cœur selon leurs conséquences pour le comportement de l'enceinte de confinement.

De plus, au stade de la conception, différentes possibilités de conception doivent être évaluées et des études de sensibilité doivent être réalisées. Cependant, l'application d'une étude probabiliste de sûreté à un stade précoce de la conception doit être faite avec précaution car les résultats finals dépendront du choix effectif des composants, des techniques des systèmes et des procédures d'exploitation.

Il est néanmoins souligné que, même pour la première évaluation au stade de la conception, le concepteur doit considérer une liste d'événements initiateurs aussi complète que possible. Il faut insister sur le fait que le traitement des défaillances de cause commune est essentiel pour l'évaluation

de certaines options de conception. Un autre sujet important est le traitement des interventions humaines, incluant le diagnostic et la maintenance. L'utilisation de données qualifiées est aussi essentielle.

Dans le cadre d'études plus complètes, les agressions internes et externes devraient être considérées avec le développement de méthodes appropriées ; de plus, le besoin et la faisabilité d'une étude probabiliste de sûreté de niveau 2 pourraient être considérés.

A.2.7 - Radioprotection des travailleurs et des personnes du public

A.2.7.1 - Expositions professionnelles des travailleurs

Comme indiqué dans la section **A.1.1**, une réduction des expositions professionnelles des travailleurs doit être recherchée par un processus d'optimisation en tenant compte des données provenant de l'expérience d'exploitation, notamment en France et en Allemagne.

Il est souligné que l'identification des options pertinentes de radioprotection est la première étape d'une approche ALARA qui doit être complétée par une évaluation comparative de l'efficacité de ces options. Des objectifs doivent être définis aussi bien en termes de doses collectives qu'en termes de doses individuelles.

L'expérience d'exploitation montre que des améliorations possibles des doses individuelles et collectives peuvent résulter de dispositions de conception, par exemple le choix de matériaux en relation avec une chimie de l'eau appropriée pour éviter les produits de corrosion, la mise en place de blindages, une meilleure fiabilité des composants, la mise en œuvre de robots et la facilité d'utilisation. En particulier, le concepteur doit considérer la facilité d'accès aux emplacements de travail, les conditions d'environnement de travail, le développement d'outils spécifiques et de robots de manière à réduire les débits de dose et/ou les durées des interventions.

Le concepteur doit aussi considérer, autant qu'il est possible et raisonnable, la réalisation d'activités non programmées telles que réparations et remplacements.

A.2.7.2 - Effluents radioactifs et déchets.

La tranche doit être conçue pour limiter, conformément au principe d'optimisation, l'exposition des personnes du public aux rayonnements résultant des relâchements de matières radioactives dans l'air ou dans l'eau. Les expositions correspondantes seront déterminées pour une personne de référence (membre du groupe critique) à l'endroit le plus défavorable en considérant toutes les voies d'exposition appropriées et en tenant compte des rejets d'autres installations.

Pour fixer les limites de rejets d'une tranche dans le cadre des procédures d'autorisation, les conditions spécifiques du site seront considérées ; une attention appropriée sera également portée à la possibilité de contributions ultérieures envisageables à l'exposition sur le site, résultant d'activités humaines.

Des dispositions de conception doivent être prises pour réduire encore l'activité et le volume des matières radioactives à évacuer de la tranche en tant que déchets. Considérant ces matières comme hypothèse de base, les efforts faits pour réduire les rejets doivent être mis en balance avec les quantités de déchets générées par ces efforts. Quant à la radioprotection, les doses pour les personnes du public provenant des rejets, les expositions des travailleurs et les doses causées par les déchets doivent être considérées dans le processus d'optimisation.

B – CARACTERISTIQUES DE SÛRETE DE BASE

B.1 - Conception des barrières

B.1.1 – Conception du cœur et du gainage du combustible

La conception des assemblages combustibles pour les tranches électronucléaires de la prochaine génération peut être fondée sur les conceptions de référence actuelles, par exemple les assemblages 17X17 avec des pastilles d' UO_2 ou d' $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$, l'excès de réactivité dans les assemblages neufs étant compensé autant que nécessaire par des poisons consommables (par exemple UO_2 mélangé avec Gd_2O_3).

Des améliorations ultérieures dans la connaissance du comportement des matériaux des assemblages de combustible en conditions normales et accidentelles de même que l'objectif de taux de combustion plus élevés que pour les réacteurs existants pourraient conduire le concepteur à proposer des évolutions de la conception du combustible. Les évolutions de la conception des combustibles et des taux de combustion doivent être introduites avec précaution. Le concepteur doit démontrer que les évolutions de la conception du combustible n'affectent pas négativement le comportement global des assemblages de combustible sous irradiation, notamment pour ce qui concerne les phénomènes de fléchissement et de déformation, et justifier les critères proposés pour les conditions normales et accidentelles. Toute demande d'autorisation relative à une modification de la conception du combustible ou de son taux de combustion doit s'appuyer sur des résultats adéquats de recherche et développement, incluant les résultats obtenus pour des assemblages de combustible de démonstration présentant un taux de combustion égal ou supérieur, et une qualification appropriée des codes de calcul (notamment pour les rampes de puissance lentes, les accidents de perte de réfrigérant et les accidents de réactivité).

Par exemple, il serait judicieux d'éliminer par la conception du combustible le risque de ruptures de gaines résultant d'interactions pastille gaine durant les transitoires de référence, sans restriction sur l'exploitation du réacteur (suivi de charge, fonctionnement prolongé à puissance réduite). Il est souligné que la démonstration correspondante devra être supportée par des justifications expérimentales.

Pour les aspects neutroniques et thermohydrauliques, les considérations développées dans le second paragraphe de cette section sur la conception du combustible s'appliquent en particulier à la courbe de puissance résiduelle et au traitement des incertitudes liées à la corrélation de flux critique pour le calcul du rapport d'échauffement critique (REC).

En ce qui concerne les coefficients de réactivité, comme cela a déjà été indiqué dans la section **A.2.1**, la conception du réacteur doit être telle que le comportement intrinsèque du réacteur soit stable (par exemple contre-réaction négative du modérateur). En principe, le coefficient de température du modérateur doit rester négatif depuis l'arrêt à chaud jusqu'aux conditions nominales avec toutes les barres de contrôle en dehors du cœur² ; le coefficient de vide du réfrigérant doit être négatif en toutes conditions.

Le suivi de la distribution de puissance dans le cœur peut être assurée par une instrumentation neutronique fixe dans le cœur, un système de mesure mobile ("aéroballe") et une instrumentation neutronique en dehors du cœur.

B.1.2 - Circuit primaire

B.1.2.1 - Exigences générales

L'intégrité de l'enveloppe du circuit primaire est une question qui nécessite une attention particulière. De hauts niveaux de qualité doivent être atteints pour ses composants, par le choix des matériaux, des processus de fabrication avec les inspections associées, des règles de calcul avec des hypothèses appropriées pour les analyses des systèmes et des accidents, des mesures prises au stade de la conception pour simplifier la maintenance et le suivi en exploitation et des procédures d'exploitation spécifiques, ainsi que par la surveillance en exploitation, incluant les inspections en service.

B.1.2.2 - Ruptures retenues à la conception

Les brèches postulées de l'enveloppe du circuit primaire font partie des événements à traiter dans la démonstration de sûreté.

A cause de phénomènes tels que les vibrations et la corrosion, la rupture des petites tuyauteries ne peut pas être exclue. D'un autre côté, la rupture guillotine complète d'une grosse tuyauterie correctement conçue, fabriquée et inspectée est très improbable ; aussi, quand des dispositions de conception, de fabrication et d'inspection adéquates sont mises en oeuvre, la rupture guillotine complète d'une tuyauterie primaire principale peut être « exclue » (au sens donné dans la section **A.1.4**). La possibilité d'accéder à chaque point de ces tuyauteries et de l'inspecter est bien sûr une condition nécessaire préalable ; le concepteur doit notamment mettre en oeuvre des dispositions permettant l'accès pour une inspection volumétrique à 100% de toutes les soudures des tuyauteries primaires principales et des parties des grosses tuyauteries connectées où des dégradations sont possibles et permettant l'utilisation de deux méthodes d'inspection volumétrique pour les soudures bimétalliques. De plus, une combinaison appropriée de méthodes disponibles doit être mise en oeuvre pour suivre les fuites primaires³.

² Cependant, certaines gestions du combustible pourraient conduire à des concentrations de bore élevées au tout début de la vie du cœur et, en conséquence, à un coefficient de température du modérateur positif.

³ Des dispositions additionnelles peuvent être mises en oeuvre localement pour détecter de faibles taux de fuite.

B.1.2.3 - Conséquences pour la démonstration de sûreté

Les chargements à considérer pour la conception des structures internes de la cuve du réacteur et pour la conception des structures dans le bâtiment de confinement sont alors limités à ceux résultant d'une rupture équivalente à la rupture guillotine complète de la plus grosse tuyauterie connectée à une tuyauterie primaire principale (ligne d'expansion du pressuriseur).

En pratique, le concepteur doit postuler que toute tuyauterie connectée à une tuyauterie primaire principale pourrait se détacher du piquage correspondant. Dans ces conditions, la section de passage à travers laquelle l'eau primaire pourrait s'échapper, une fois la tuyauterie rompue déplacée, est égale à la section interne du piquage ; aucun limiteur de débit ne peut être pris en compte pour les calculs correspondants (débit massique, onde de pression, ...).

De plus, le débit massique équivalent à une rupture doublement débattue d'une tuyauterie primaire principale doit être retenu pour la conception de la fonction de refroidissement de secours du cœur (en utilisant des hypothèses et des modèles réalistes et des critères appropriés, à proposer par le concepteur) et de l'enveloppe sous pression du bâtiment de confinement, de manière à obtenir des marges de sûreté pour le refroidissement du cœur en vue d'éviter la fusion du cœur et pour la fonction de confinement ; la rupture doublement débattue doit aussi être retenue pour les supportages des composants et pour la qualification des équipements.

B.1.3 – Exigences relatives aux tuyauteries secondaires principales

Pour le circuit secondaire, les ruptures des tuyauteries principales de vapeur entre les générateurs de vapeur et les premiers organes d'isolement à l'extérieur du bâtiment du réacteur ou les premiers points fixes situés après ces organes et des tuyauteries principales d'alimentation en eau situées entre les générateurs de vapeur et les traversées du bâtiment du réacteur pourraient être « exclues » si les exigences suivantes sont satisfaites :

- de manière générale, des exigences réglementaires et des codes de construction visant une haute qualité doivent être appliqués ; de plus, les exigences de conception doivent être plus sévères que les règles générales pour les tuyauteries de classe 1⁴ ;
- les effets hydrodynamiques significatifs doivent être évités ;
- les points fixes doivent être aussi proches que possible des traversées de l'enceinte de confinement ;
- les matériaux doivent rester dans le plateau ductile pour les températures les plus basses qui pourraient être rencontrées durant les transitoires, incidents et accidents de référence ;
- les tuyaux et les coudes doivent être sans soudures. Les singularités géométriques et les concentrations de contraintes doivent être évitées ; ceci s'applique notamment aux soudures aux supports, attaches et fixations. Les soudures ou fixations temporaires doivent être interdites ;
- la chimie de l'eau doit être contrôlée avec une haute fiabilité ;
- l'installation des circuits doit permettre un accès facile à toutes les surfaces extérieures des tuyauteries ; l'inspection en service des zones soudées doit être possible, en utilisant des méthodes efficaces.

⁴ Au sens des codes techniques relatifs aux équipements mécaniques.

De plus, les possibilités de défaillance de cause commune des tuyauteries principales de vapeur et des tuyauteries principales d'alimentation en eau doivent être réduites autant que possible par une séparation adéquate des circuits.

En tout état de cause, le concepteur doit postuler que toute tuyauterie connectée aux tuyauteries secondaires principales pourrait se séparer de son piquage.

Il doit aussi être souligné que le concepteur doit définir les cas de charge qu'il considérera pour la conception mécanique des supportages et des structures internes des générateurs de vapeur et pour les supportages des lignes principales vapeur et des lignes principales d'alimentation en eau à l'intérieur du bâtiment du réacteur.

B.1.4 - Fonction de confinement

Comme déjà indiqué dans la section **A.1.2**, les objectifs généraux établis pour les tranches électronucléaires de la prochaine génération demandent une amélioration substantielle de la fonction de confinement ; la stratégie générale relative aux accidents graves énoncée dans la section **A.1.3** présente plus précisément des objectifs techniques concernant cette fonction.

B.1.4.1 - Exigences de conception pour l'enceinte de confinement et les bâtiments périphériques

Ces objectifs peuvent être atteints par l'utilisation d'un concept d'enceinte de confinement à double paroi comprenant une paroi intérieure en béton précontraint, une paroi externe en béton armé, avec l'espace annulaire entre les parois interne et externe maintenu à une pression inférieure à la pression atmosphérique de manière à collecter toutes les fuites possibles à travers la paroi interne et à les filtrer avant leur rejet dans l'environnement par la cheminée.

La pression de dimensionnement et la température de dimensionnement de la paroi interne de l'enceinte de confinement doivent être telles qu'elles autorisent une période de grâce d'au moins 12 heures sans évacuation de la puissance hors de l'enceinte de confinement après un accident grave et qu'elles assurent son intégrité et son étanchéité même après la déflagration globale de la quantité maximale d'hydrogène qui pourrait être contenue dans le bâtiment de confinement au cours d'accidents de fusion du cœur à basse pression (voir section **A.1.3**). Il peut être supposé que cette quantité d'hydrogène n'est pas produite et relâchée instantanément dans l'enceinte de confinement, mais selon une fonction du temps dépendant des séquences représentatives des accidents graves ; des recombineurs catalytiques peuvent être utilisés pour réduire de manière substantielle la quantité d'hydrogène dans l'enceinte de confinement et les concentrations d'hydrogène en fonction du temps. Ainsi, la quantité d'hydrogène à considérer pour la conception de la paroi interne de l'enceinte de confinement dépend notamment de paramètres tels que les caractéristiques du cœur, les relâchements d'hydrogène dans l'enceinte en fonction du temps, l'efficacité des recombineurs catalytiques.

De plus, le volume de l'enceinte de confinement et les moyens de limitation des conséquences doivent être tels qu'ils empêchent la possibilité d'une détonation globale d'hydrogène. Les possibilités de concentrations élevées d'hydrogène doivent être évitées autant qu'il est possible par la conception des structures internes de l'enceinte de confinement ; en outre, des dispositions spécifiques, telles que des parois renforcées des compartiments et de l'enceinte de confinement, doivent être mises en œuvre autant que nécessaire pour faire face à des phénomènes tels que des déflagrations locales rapides ou des séquences de transition déflagration-détonation (cf. paragraphe **E.2.2.4**).

Concernant le radier, les objectifs indiqués dans la section **A.1.3** relatifs aux situations de fusion du cœur à basse pression peuvent être atteints par la mise en place d'un grand compartiment d'étalement du corium refroidi de manière adéquate.

Un faible taux de fuite de la paroi interne de l'enceinte de confinement est essentiel⁵. Au vu de l'expérience existante, il est recommandé d'utiliser, pour cette paroi interne, du béton à hautes performances présentant de faibles déformations différées. Des produits d'injection devraient être utilisés systématiquement, notamment à chaque reprise de bétonnage et à chaque interface entre béton et fourreau de traversée. Une attention particulière doit aussi être portée aux mesures de conception en vue d'obtenir une étanchéité adéquate du béton précontraint dans toutes les zones singulières comme le radier, le gousset, la zone entre la console support du pont polaire et la ceinture du dôme, le voisinage du sas matériel et le dôme. En tout état de cause, la mise en place d'une peau d'étanchéité sur la paroi interne du bâtiment de confinement apparaît nécessaire localement sur toutes les zones singulières⁶.

Des tests périodiques d'étanchéité de l'enceinte de confinement doivent pouvoir être réalisés à la pression de dimensionnement de ce bâtiment. En principe, un essai en air à la pression de dimensionnement de l'enceinte de confinement doit être fait avant la mise en place de la peau d'étanchéité sur la paroi interne de manière à détecter tout défaut majeur de construction qui pourrait être masqué par l'étanchéité de cette peau. Des dispositions doivent aussi être mises en œuvre pour vérifier et pouvoir rétablir si nécessaire l'étanchéité adéquate de la paroi externe du bâtiment de confinement.

⁵ Les calculs de conséquences radiologiques montrent que, pour un concept d'enceinte de confinement à double paroi tel que décrit dans cette section, en supposant un taux de fuite de 1% par jour ou moins de l'atmosphère de l'enceinte de confinement vers l'espace annulaire et l'absence de fuite directe de cette enceinte de confinement vers l'atmosphère extérieure, les conséquences radiologiques d'une brèche primaire de taille moyenne suivie d'une fusion du cœur à basse pression sont cohérentes avec les objectifs indiqués dans la section **A.1.1**.

⁶ Dans la mesure où l'efficacité et la robustesse du concept de limitation des conséquences du risque hydrogène seront clairement démontrées, la mise en place d'une peau d'étanchéité sur toute la surface interne du bâtiment de confinement n'est pas nécessaire.

Des dispositifs spécifiques doivent être mis en place pour collecter les fuites possibles associées aux différents types de traversées⁷ de même que des dispositions assurant des possibilités de confinement adéquates pour les bâtiments périphériques.

Une information détaillée doit être fournie par le concepteur sur le système de recueil des fuites de l'enceinte de confinement et de suivi de l'étanchéité de celle-ci : critères de conception et d'exploitation (étanchéité, tests périodiques,...), qualification des vannes aux conditions ambiantes correspondantes, protection contre les agressions (telles que définies dans les sections **A.2.4** et **A.2.5**) qui pourraient endommager les équipements du système...

Concernant les bâtiments périphériques, une valeur d'étanchéité doit être définie pour chacun des bâtiments périphériques ayant une fonction de confinement, y compris le bâtiment des auxiliaires nucléaires, le bâtiment des auxiliaires de sauvegarde et le bâtiment du combustible usé. De plus, des moyens adéquats doivent être considérés pour restaurer l'étanchéité du bâtiment des auxiliaires de sauvegarde à la suite d'une brèche du système d'injection de sécurité et d'évacuation de la puissance résiduelle à l'extérieur du bâtiment de confinement.

Des dispositions doivent également être mises en place pour maintenir autant que nécessaire une pression négative dans l'enceinte de confinement et dans les bâtiments périphériques durant les états d'arrêt, en tenant compte de l'emplacement du combustible durant ces états.

B.1.4.2 - Prévention des bypasses du confinement

Comme indiqué dans la section **A.1.3**, les séquences de fusion du cœur avec bypass du confinement (par les générateurs de vapeur ou par des circuits connectés au système primaire et sortant de l'enceinte de confinement) doivent être « pratiquement éliminées ».

Ceci implique un examen systématique de toutes les séquences de bypass envisageables, avec une analyse déterministe des lignes de défense correspondantes, complétée par les résultats d'études probabilistes de sûreté. Les aspects suivants peuvent être mentionnés :

- a/ la liste des séquences envisageables de bypass de l'enceinte de confinement doit inclure les fuites du système d'évacuation de la puissance de l'enceinte de confinement, les bypasses de l'enceinte de confinement par le système de collecte des fuites, les effluents liquides traversant l'espace entre enceintes,

⁷ Ces dispositifs devraient inclure un système de reprise des fuites du sas matériel, des sas personnel et de secours, du tube de transfert du combustible ainsi que de certaines traversées mécaniques en communication avec des locaux ventilés

b/ d'une manière générale, concernant les fuites et brèches des circuits connectés au système de refroidissement du réacteur, des dispositions de conception doivent être mises en place pour éviter une surpression dans les parties à basse pression des systèmes connectés ou pour assurer un dimensionnement adéquat de ces parties à l'égard des surpressions. Les dispositions correspondantes doivent être spécifiées (pression de dimensionnement et température de dimensionnement de même que les critères associés). De plus, des exigences strictes doivent être appliquées aux moyens mis en place pour détecter les fuites primaires dans les bâtiments périphériques et éviter leurs conséquences. Les exceptions doivent être justifiées au cas par cas ; ceci s'applique aux moyens de détection des fuites dans le bâtiment des auxiliaires nucléaires.

Pour les circuits connectés au système primaire, le concepteur doit étudier l'utilisation de moyens d'isolement diversifiés, les possibilités de défaillances de ces moyens et les équipements de suivi associés, de même que l'utilisation de tuyauteries conçues pour résister à la pression primaire dans les situations correspondantes. De plus, le risque de bipasse de l'enceinte de confinement par les tuyauteries équipées seulement de vannes manuelles doit être étudié par le concepteur.

Pour ce qui concerne le grand réservoir d'eau borée utilisé pour l'injection de sécurité et situé à l'intérieur du bâtiment du réacteur, les lignes d'aspiration à l'extérieur de l'enceinte de confinement doivent être équipées jusqu'à la première vanne d'une double enveloppe conçue pour tenir aux conditions accidentelles dans l'enceinte de confinement non seulement au début de l'accident mais aussi à long terme durant l'accident ; les doubles enveloppes doivent être conçues de manière à permettre des inspections périodiques des tuyauteries internes d'aspiration. De plus, les conséquences d'une fuite d'une tuyauterie interne doivent être étudiées.

Les séquences accidentelles de fusion du cœur avec une fuite significative des tubes des générateurs de vapeur (jusqu'à la rupture multiple de tubes des générateurs de vapeur) doivent être « pratiquement éliminées ». A ce sujet, le concepteur doit étudier les situations mentionnées au paragraphe **E.2.2.5**.

Pour ce qui concerne les séquences accidentelles de fusion du cœur qui pourraient survenir dans les états d'arrêt avec le bâtiment de confinement ouvert, ce qui ne sera autorisé que pour certaines phases (voir paragraphe **E.2.2.5**), le concepteur doit montrer que, pour des séquences accidentelles représentatives, l'enceinte de confinement sera fermée de manière fiable avant que des rejets radioactifs significatifs ne puissent se produire dans l'enceinte de confinement ; cette exigence concerne notamment le sas matériel, en tenant compte du temps disponible avant ébullition de l'eau dans le cœur du réacteur et des conditions ambiantes dans le bâtiment du réacteur de même que le besoin de systèmes supports s'il y a lieu.

B.2 - Fonctions et systèmes de sûreté

B.2.1 – Classement des fonctions, barrières, structures et systèmes de sûreté

Une fonction de sûreté⁸ peut être définie comme l'action combinée d'un ensemble de dispositions

⁸ A distinguer des fonctions fondamentales de sûreté mentionnées dans la section **A.1.2**.

techniques pour accomplir une certaine tâche dans un certain état de la tranche. Une fonction de sûreté peut être accomplie par un ou plusieurs systèmes.

La mise en œuvre du principe de « défense en profondeur » peut s'appuyer sur l'introduction d'un classement des fonctions et des systèmes de sûreté. Le but de ce classement est de définir des exigences générales applicables aux fonctions et systèmes de sûreté avec une hiérarchisation des exigences selon l'importance de ces fonctions et systèmes pour la sûreté.

Une manière possible de définir un classement approprié est d'étudier les différents transitoires, incidents et accidents de référence, selon leurs fréquences estimées, en considérant deux états physiques :

- a) dans l'état "contrôlé", le cœur est sous-critique (un retour en criticité de courte durée avant les actions de l'opérateur conduisant seulement à une puissance neutronique faible pourrait être accepté au cas par cas pour quelques événements), l'évacuation de la puissance est assurée à court terme par exemple par les générateurs de vapeur, l'inventaire en eau du cœur est stable, les rejets radioactifs restent tolérables⁹;
- b) dans l'état d'arrêt sûr, le cœur est sous-critique, la chaleur résiduelle est évacuée durablement¹⁰, les rejets radioactifs restent tolérables⁹.

Pour les conditions avec défaillances multiples, un état final peut être défini : le cœur est sous-critique, la puissance résiduelle est évacuée par les systèmes primaire ou secondaire, les rejets radioactifs restent tolérables⁹.

Avec ces définitions :

- les fonctions de sûreté nécessaires pour atteindre l'état "contrôlé" après un transitoire, un incident ou un accident de référence sont classées F1A ;
- les fonctions de sûreté nécessaires au-delà de l'état "contrôlé" pour atteindre et maintenir l'état d'arrêt sûr après un transitoire, un incident ou un accident de référence sont classées F1B ;
- les fonctions de sûreté nécessaires pour atteindre l'état final pour les conditions avec défaillances multiples sont classées F2. De plus, les fonctions de sûreté nécessaires pour faire face aux agressions internes et aux agressions externes sont aussi classées F2¹¹. Enfin, les fonctions de contrôle-commande qui contribuent à maintenir les conditions initiales du réacteur à l'intérieur des limites retenues dans la démonstration de sûreté ainsi que les fonctions de limitation mises en place pour éviter les déclenchements inutiles d'actions de protection sont classées F2.

Le classement des systèmes de sûreté (incluant en principe les systèmes supports) peut se déduire du classement des fonctions de sûreté :

⁹ En cohérence avec les objectifs indiqués dans la section **A.1.4**.

¹⁰ Les chaînes de refroidissement sont capables de transférer durablement la chaleur jusqu'à la source froide ultime.

¹¹ Quand elles sont étudiées selon une approche événementielle.

- si pour au moins un transitoire, un incident ou un accident de référence, un système donné doit accomplir une fonction F1A, ce système est classé F1A ; cependant, les systèmes supports d'une fonction F1A peuvent être classés F1B s'ils sont en service et sans nécessité de changement d'état quand l'événement arrive et s'ils ne sont pas rendus défaillants par l'événement ;
- si pour au moins un transitoire, un incident ou un accident de référence, un système donné doit accomplir une fonction F1B, ce système est classé au moins F1B ;
- si pour la prévention ou la limitation des conséquences d'une condition avec défaillances multiples, un système donné est important pour réduire significativement la fréquence de fusion du cœur, ce système est classé au moins F2.

Les exigences générales pour un système F1A sont : application du critère de défaillance unique¹² (au niveau du système), séparation physique des trains redondants, alimentation électrique secourue par les diesels de secours principaux, essais périodiques, assurance de la qualité, tenue aux séismes et, pour les équipements correspondants, utilisation de codes de conception acceptés et qualification aux conditions accidentelles.

Les exigences générales pour un système F1B sont : application du critère de défaillance unique (au niveau de la fonction), séparation physique des trains redondants (au niveau de la fonction), alimentation électrique secourue par les diesels de secours principaux, essais périodiques, assurance de la qualité, tenue aux séismes et, pour les équipements correspondants, utilisation de codes de conception acceptés et qualification aux conditions accidentelles.

Les exigences générales pour un système F2 sont : essais périodiques, assurance de la qualité et utilisation de codes de conception acceptés pour les équipements correspondants ; séparation physique est mise en place quand un système F2 est utilisé en secours d'un système F1A ou F1B ; les exigences relatives au secours électrique, à la tenue aux séismes et à la qualification aux conditions accidentelles des équipements correspondants sont définies au cas par cas.

En outre, le concept de classement doit tenir compte des barrières, en relation avec la prévention, la maîtrise et la limitation des conséquences des rejets radioactifs. Ceci implique que le classement des barrières relatives aux différentes sources radioactives complète le classement déduit des études relatives aux transitoires, incidents et accidents de référence et aux conditions avec défaillances multiples ; un système, un équipement ou une structure peut dès lors être classé pour sa fonction barrière aussi bien que pour sa fonction de protection des barrières.

¹² La définition du critère de défaillance unique et sa combinaison avec la maintenance préventive sont présentées dans la section **C.2.1**.

Tous les équipements ayant un classement en tant que barrière doivent avoir un classement fonctionnel au moins égal à F2 et les équipements mécaniques correspondants doivent être conçus au moins selon les codes techniques appropriés. En outre, des exigences fonctionnelles (par exemple d'étanchéité) et d'exploitation (par exemple de maintenance, d'essais périodiques) précises doivent être définies pour les systèmes ayant un classement en tant que barrière et les bâtiments assurant une fonction de confinement, et ce pour toutes les parties de la tranche. Ces exigences doivent aussi prendre en compte l'étude des agressions internes et externes ; aussi, une attention appropriée doit être portée aux composants présentant du fait de leur haute énergie, un risque d'endommagement.

Une attention spécifique doit être portée au classement des barrières et aux exigences associées pour les vannes d'isolement de l'enceinte de confinement, pour les traversées du système de collecte des fuites et pour le tube de transfert de même que pour les équipements actifs et passifs, les structures et autres dispositifs liés au confinement de la piscine du combustible usé.

B.2.2 - Exigences pour les équipements de sûreté

B.2.2.1 - Qualification des équipements de sûreté

Les équipements nécessaires à la démonstration de sûreté doivent être qualifiés pour les conditions pour lesquelles ils sont nécessaires.

La qualification inclut le fonctionnement et la fiabilité, en tenant compte des conditions d'environnement auxquelles les matériaux et les équipements seraient exposés dans la tranche, y compris les conditions d'accident grave. Le processus de qualification doit être achevé avant le démarrage de la tranche, en particulier pour les matériaux et équipements nouveaux.

Le concepteur doit préciser son approche générale de qualification des équipements classés ; cette approche doit être appliquée à tous les types d'équipements (mécaniques, électriques...) à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment du réacteur et tenir compte des conditions accidentelles internes et externes ainsi que du vieillissement.

Pour cette approche, les méthodes de qualification et les profils standards enveloppant les conditions ambiantes pour les situations de référence de même que pour les situations d'accident grave doivent être définies et leur représentativité doit être justifiée (notamment pour le vieillissement).

Pour ce qui concerne les équipements électriques, la qualification peut être obtenue en testant un ou plusieurs échantillons de ces équipements par une séquence de tests représentatifs conventionnels ou par une démonstration claire de la capacité de ces équipements à fonctionner dans des conditions définies, par exemple par analogie avec d'autres équipements ; une combinaison des deux méthodes peut aussi être utilisée. Le retour d'expérience peut aussi être considéré. En principe, les séquences d'essais pour la qualification sismique incluent le vieillissement avant les essais sismiques et les

séquences d'essais pour la qualification à l'accident de perte de réfrigérant primaire (APRP) incluent le vieillissement et les essais de qualification sismique avant les essais APRP. Pour ces essais APRP, des profils correspondant à des conditions thermodynamiques, chimiques et d'irradiation enveloppes dans l'enceinte de confinement doivent être définis avec des marges adéquates.

Dans le but d'éviter toute dégradation de la fonction de refroidissement de secours du cœur, la production de débris en conditions accidentelles, en particulier de débris de matériaux d'isolation, doit être prise en compte dans l'approche de qualification.

B.2.2.2 - Systèmes de sûreté informatisés

Pour obtenir la haute fiabilité nécessaire pour les systèmes de contrôle-commande, le concepteur doit, lorsque des systèmes informatisés sont utilisés, mettre en place des exigences de sûreté spécifiques, pour la qualification de tels systèmes informatisés pour chaque classe de sûreté, y compris des règles de conception pour les logiciels.

Les trois principes principaux pour la conception de calculateurs pour des systèmes de sûreté sont l'évitement de défauts, l'élimination des défauts et la tolérance aux défauts.

L'évitement des défauts peut être mis en oeuvre dans une approche de construction par des règles et directives strictes applicables durant tout le cycle de vie d'un système, incluant la spécification du système (matériels, logiciels et intégration), la production (conception, codage des logiciels et mise en place des matériels, essais), l'exploitation et la maintenance.

L'évitement des défauts doit être complété par une approche analytique pour l'élimination des défauts. Ceci inclut des procédures non formelles comme des inspections, des relectures, des audits, des revues de même que des procédures formelles comme des preuves d'exactitude, des analyses statiques et différents essais d'intégration.

Pour faire face aux défauts résiduels qui subsisteraient en dépit de toutes les mesures prises pour l'évitement et l'élimination des défauts, la tolérance aux défauts doit être introduite dans la conception. Pour les matériels, ceci peut être atteint par la redondance et la diversification. La diversification doit être examinée pour obtenir la tolérance aux défauts des logiciels.

B.2.3 - Exigences applicables à des fonctions de sûreté spécifiques

B.2.3.1 - Fonction de contrôle de la réactivité

La fonction de contrôle de la réactivité peut être accomplie par des barres de contrôle et des systèmes d'injection d'eau borée, incluant un système de borication supplémentaire à deux trains, chacun d'eux étant capable d'amener le réacteur de l'état contrôlé à l'état d'arrêt sûr pour tout transitoire, incident ou accident de référence autre qu'une perte de réfrigérant primaire, sans solliciter l'ouverture des soupapes de sûreté du pressuriseur. Ce système doit être classé F1B pour cette fonction de sûreté et peut être mis en service manuellement. De plus, ce système doit être mis en service automatiquement pour les transitoires avec défaillance de l'arrêt d'urgence ; les fonctions de contrôle-commande correspondantes doivent être classées F2.

Concernant les ouvertures intempestives des vannes du circuit secondaire de même que les brèches des lignes secondaires, le concepteur doit préciser si le réacteur peut redevenir critique après l'arrêt d'urgence du réacteur au cours de tels transitoires, incidents ou accidents ; les équipements de contrôle-commande doivent être classés en conséquence.

Concernant les dilutions du bore homogènes, le concepteur doit étudier la mise en place l'activation de l'arrêt d'urgence ou d'un système de borication au moins pour les transitoires de référence de dilution homogène.

En tout état de cause, la fiabilité de la fonction d'arrêt d'urgence doit être suffisamment élevée pour contribuer à « pratiquement éliminer » les séquences de fusion du cœur à haute pression. Nonobstant le rôle du système de borication supplémentaire, des moyens adéquats doivent être mis en œuvre dans cet objectif, tels qu'une diversification des composants principaux du système d'arrêt d'urgence (mesures physiques, signaux et traitements associés, disjoncteurs d'arrêt d'urgence).

Comme indiqué dans la section **A.1.3**, les accidents de réactivité résultant de l'introduction rapide d'eau froide ou d'eau insuffisamment borée doivent être évités par des dispositions de conception de telle sorte qu'ils puissent être « exclus ». Parmi ces dispositions de conception, des dispositifs automatiques permettant d'éviter la formation intempestive d'un bouchon d'eau diluée, des dispositifs de détection de fuite, le suivi de la concentration en bore des systèmes doivent être considérés autant qu'il est approprié.

B.2.3.2 - Fonction d'évacuation de la puissance résiduelle

La fonction d'évacuation de la puissance résiduelle doit être assurée avec une fiabilité élevée. De manière générale, un système à quatre trains conçu pour accomplir la fonction d'évacuation de la puissance résiduelle et la fonction d'injection de sécurité à basse pression peut convenir dans la mesure où des dispositions adéquates sont mises en oeuvre pour les parties du système d'évacuation de la puissance résiduelle situées à l'extérieur du bâtiment du réacteur, de manière à « pratiquement éliminer » les séquences d'accident grave avec bipasse du confinement.

La puissance résiduelle doit être transportée du système combiné d'évacuation de la puissance résiduelle et d'injection de sécurité à basse pression à la source froide ultime par un système de refroidissement intermédiaire.

Cependant, une démonstration détaillée doit être fournie par le concepteur concernant l'obtention de l'état d'arrêt sûr pour les différentes situations accidentelles à considérer pour les différents états de la tranche. Une attention particulière doit être portée aux séquences d'événements pour lesquelles un basculement d'un mode d'exploitation à l'autre des trains du système combiné d'évacuation de la puissance résiduelle et d'injection de sécurité à basse pression est nécessaire ainsi qu'aux délais correspondants ; en outre la diversification et l'adéquation des signaux d'injection automatique d'eau ainsi que le caractère suffisant du débit d'appoint doivent être justifiés ; enfin, l'adéquation de l'appoint d'eau manuel prévu pour faire face à une défaillance des moyens automatiques doit être démontrée.

Le retour d'expérience a montré qu'une attention particulière doit être portée à la possibilité d'une perte d'un niveau d'eau adéquat durant les états d'arrêt où le cœur est dans la cuve du réacteur. Des dispositions de conception doivent être mises en oeuvre afin de réduire le besoins d'exploitation à mi-boucles quand le cœur est dans la cuve du réacteur¹³ et afin de faire face à la perte du système normal d'évacuation de la puissance résiduelle. De plus, les caractéristiques de conception de la mesure du niveau d'eau dans les boucles nécessitent une attention particulière ; des moyens diversifiés devraient être mis en place. Les hypothèses relatives à la remise en service des pompes du système d'évacuation de la puissance résiduelle après une baisse du niveau d'eau doivent être clairement justifiées.

¹³ Il serait judicieux que durant les arrêts normaux pour rechargement, la maintenance des générateurs de vapeur et les inspections en service soient conduites uniquement quand le cœur est totalement déchargé.

Enfin, les situations qui nécessitent un abaissement du niveau d'eau dans le circuit primaire au cours des états d'arrêt doivent être définies et justifiées par le concepteur, de même que les dispositions - incluant les marges de conception, l'instrumentation et les procédures adéquates – mises en oeuvre pour faire face aux risques associés.

B.2.3.3 - Fonction de refroidissement de secours du cœur

Les hypothèses de brèches à considérer pour la fonction de refroidissement de secours du cœur sont définies dans la section **B.1.2** ; les autres hypothèses relatives à la conception des systèmes correspondants sont indiquées dans la partie **D.2**.

La fonction de refroidissement de secours du cœur peut être assurée par un concept optimisé comprenant une injection de sécurité à moyenne pression dans les branches froides avec une pression de refoulement inférieure au point de consigne d'ouverture des soupapes de sûreté des générateurs de vapeur, des accumulateurs injectant dans les branches froides et une injection de sécurité à basse pression dans les branches froides, avec basculement à une injection combinée dans les branches froides et chaudes après une période de quelques heures, les systèmes d'injection utilisant l'eau d'un grand réservoir d'eau implanté à l'intérieur du bâtiment de confinement.

La mise en place d'un grand réservoir d'eau borée à l'intérieur du bâtiment du réacteur apporte des avantages significatifs pour faire face aux accidents de perte de réfrigérant primaire. Néanmoins, une attention appropriée doit être portée au bon mélange de l'eau contenue dans le réservoir et à l'accroissement de la température de cette eau (une sous-saturation devrait être maintenue) au cours de tels accidents (en relation avec le volume du réservoir), ainsi qu'à la qualité de l'eau pour la conception des pompes du système de refroidissement de secours du cœur.

La fonction du système de refroidissement de secours du cœur pour « pratiquement éliminer » les situations de fusion du cœur à haute pression doit aussi être considérée.

B.2.3.4 - Fonction d'évacuation de la chaleur par les circuits secondaires

La fonction d'évacuation de la chaleur par les circuits secondaires mérite une attention particulière. Elle doit avoir la capacité d'évacuer la chaleur du cœur du réacteur via les générateurs de vapeur en association avec les vannes de décharge des générateurs de vapeur et de l'alimentation de secours en eau des générateurs de vapeur pendant les transitoires, incidents et accidents de référence. Après un arrêt du réacteur, la transition du côté primaire de l'état sous-critique à chaud à des conditions intermédiaires doit être assurée par cette fonction pour permettre ensuite l'obtention de l'état sous-critique à froid par la fonction d'évacuation de la chaleur résiduelle côté primaire.

Pour des événements particuliers (petite brèche primaire et rupture d'un tube de générateur de vapeur), la fonction d'évacuation de la chaleur par les circuits secondaires doit avoir la capacité d'assurer de manière fiable le refroidissement du circuit primaire jusqu'aux conditions permettant le fonctionnement du système de refroidissement de secours du cœur¹⁴ (fiabilité du système de démarrage et d'arrêt, fiabilité du contournement au condenseur).

Pour obtenir « l'élimination pratique » des séquences de fusion du cœur à haute pression liées à la perte des systèmes d'alimentation en eau normal et de secours, le concepteur doit mettre en place et justifier une combinaison adéquate de moyens, incluant un système indépendant de démarrage et d'arrêt, une réserve d'eau accrue dans chaque générateur de vapeur en comparaison avec les tranches existantes, l'utilisation du gavé-ouvert secondaire de même que du gavé-ouvert primaire (mis en service automatiquement ou manuellement).

B.2.3.5 - Fonction d'évacuation de la puissance hors de l'enceinte de confinement

La fonction d'évacuation de la chaleur de l'enceinte de confinement dans les conditions d'une fusion du cœur à basse pression peut être réalisée par un système accomplissant une aspersion dans l'enceinte et un refroidissement du corium, divisé en deux trains, un train étant suffisant au bout de 15 jours pour maintenir la pression dans l'enceinte en dessous de la pression de dimensionnement. Ces trains seraient refroidis par une chaîne dédiée diversifiée par rapport au système de refroidissement intermédiaire des équipements utilisé par les systèmes liés à la prévention de la fusion du cœur. Les deux trains de cette chaîne de refroidissement dédiée seraient secourus électriquement par les petits diesels tels que décrits au paragraphe **B.2.4.1**.

Il est souligné qu'un système d'évacuation de la chaleur de l'enceinte de confinement avec une recirculation de fluide radioactif en dehors de cette enceinte implique de traiter les défaillances possibles des tuyauteries correspondantes et les conséquences radiologiques associées.

B.2.3.6 - Fonctions de protection contre les surpressions et de dépressurisation du circuit primaire

Une protection adéquate du circuit primaire contre les surpressions doit être mise en place pour les différents transitoires, incidents et accidents de référence ainsi que pour les transitoires avec défaillance de l'arrêt d'urgence. Une protection contre les surpressions doit aussi être mise en place pour les circuits connectés au circuit primaire (comme le système conçu pour accomplir la fonction d'évacuation de la puissance résiduelle et l'injection de sécurité à basse pression, lorsqu'il est connecté au circuit primaire).

¹⁴ L'ouverture des vannes du pressuriseur pourrait ne pas être suffisante pour rendre le système d'injection de sécurité efficace.

Concernant les surpressions à froid, une protection adéquate de ce système et du système de refroidissement du réacteur dans les états d'arrêt à froid peut être fournie par les soupapes de sûreté du pressuriseur, leur ouverture étant commandée par un ordre dédié élaboré par un signal de pression dérivé d'un seuil de pression.

D'un autre côté, le système de dépressurisation du circuit primaire doit être conçu pour contribuer à la prévention de la fusion du cœur par la fonction gavé-ouvert primaire.

La fonction de dépressurisation ayant pour but de transformer les séquences de fusion du cœur à haute pression en séquences de fusion du cœur à basse pression (cf. section **A.1.3**) peut être assurée en ajoutant à la fonction de dépressurisation des soupapes du pressuriseur, une vanne de décharge dédiée munie d'une vanne d'isolement, ces vannes étant conçues de telle sorte que leur ouverture puisse être garantie même pour des températures de gaz élevées. Cette fonction de décharge doit être disponible en cas de perte des sources électriques externes et d'indisponibilité de tous les diesels. Une fois ouverte, la décharge devrait rester ouverte avec une haute fiabilité tout au long de la progression de l'accident.

B.2.3.7 - Fonction de protection contre les surpressions dans les circuits secondaires

La fonction de protection contre les surpressions dans les circuits secondaires peut être réalisée par une association de lignes de décharge de vapeur isolables et de soupapes de sûreté implantées entre le bâtiment du réacteur et les vannes d'isolement de vapeur principales. Le caractère adéquat de cette association de lignes de décharge et de soupapes de sûreté doit être vérifié en considérant aussi l'évacuation de la puissance résiduelle, la limitation des rejets radioactifs et la prévention d'un refroidissement excessif du cœur du réacteur.

Pour la fonction de protection contre les surpressions, l'arrêt d'urgence du réacteur peut être pris en compte en tant que mesure de réduction de la pression, ce qui permet de réduire la capacité de décharge totale, pourvu que la fiabilité et la diversification des dispositions relatives à l'arrêt d'urgence du réacteur soient similaires à celles relatives à la protection du cœur. Cette approche peut être utilisée pour les transitoires, incidents et accidents de référence. Pour les transitoires, de brefs dépassements de la pression de dimensionnement des tuyauteries de vapeur peuvent être tolérés pour autant que les soupapes de sûreté ne soient pas sollicitées. En outre, les transitoires avec défaillance de l'arrêt d'urgence doivent être traités ; les transitoires les plus pénalisants quant à l'accroissement de la pression du côté primaire et du côté secondaire doivent être examinés, en tenant compte des durées des transitoires et de l'influence de ces durées sur la fiabilité des vannes secondaires.

Les vannes de décharge et les soupapes de sûreté doivent être qualifiées pour les conditions de fluides qui pourraient survenir pendant leur utilisation.

Plus précisément, du point de vue de la sûreté, la fonction de protection contre les surpressions secondaires pourrait être accomplie pour chaque générateur de vapeur par deux soupapes de sûreté, chacune d'elles ayant une capacité de décharge de 25%, en plus d'une ligne de décharge de vapeur (avec une vanne d'isolement et une vanne de décharge régulée) ayant une capacité de décharge de 50 %, Le point de consigne pour l'arrêt d'urgence du réacteur serait fixé à une valeur inférieure ou égale à la pression de conception des générateurs de vapeur. Les points de consigne et les caractéristiques d'ouverture des soupapes de sûreté et des vannes de décharge devraient être choisis de telle sorte qu'il n'y ait pas de sollicitation des soupapes de sûreté en cas de rupture d'un tube de générateur de vapeur. Ce concept implique le classement des lignes de décharge de vapeur comme systèmes F1A ; de plus, une fiabilité adéquate des vannes correspondantes doit être clairement démontrée.

B.2.4 - Exigences applicables aux systèmes de sûreté supports

B.2.4.1 - Alimentations électriques

Les alimentations électriques sont essentielles comme systèmes supports pour la réduction de la fréquence de fusion du cœur et pour "l'élimination pratique" des séquences de fusion du cœur à haute pression.

Pour une installation générale de la tranche avec des systèmes de sûreté à quatre trains, une fiabilité adéquate des alimentations électriques pourrait être obtenue par la mise en place de quatre diesels principaux identiques, complétés par deux petits diesels capables de secourir en particulier deux des pompes d'alimentation de secours des générateurs de vapeur et les systèmes supports nécessaires.

Les petits diesels doivent être diversifiés par rapport aux quatre diesels principaux afin d'éliminer autant que possible les défaillances de cause commune entre les deux types de diesels, en tenant compte du retour d'expérience de tels diesels, et connectés à des jeux de barres électriques de tensions différentes.

L'indépendance entre les diesels principaux et les petits diesels doit être complètement justifiée par une étude des modes de défaillance des diesels. Notamment, les probabilités de défaillance des diesels principaux et des petits diesels doit tenir compte des risques de défaillance de leurs batteries, en considérant de façon appropriée le retour d'expérience correspondant.

Une considération appropriée doit aussi être portée aux tableaux électriques et aux possibilités de défaillances de cause commune dans ces tableaux.

B.2.4.2 - Système de refroidissement intermédiaire et système d'eau brute secouru

Le système de refroidissement intermédiaire et le système d'eau brute secouru sont des systèmes supports importants pour transférer à la source froide ultime la chaleur résiduelle du système conçu pour accomplir les fonctions d'évacuation de la puissance résiduelle et d'injection de sécurité à basse pression.

Les défaillances possibles de cause commune du système de refroidissement intermédiaire et du système d'eau brute secouru doivent être complètement étudiées.

De plus, le concepteur doit montrer que la capacité d'évacuation de la chaleur de chaque échangeur de chaleur entre le système de refroidissement intermédiaire et le système d'eau brute secouru est adéquate pour toutes les conditions d'exploitation normales, incluant les états à l'arrêt, de même que pour les transitoires, incidents et accidents de référence. La fiabilité des dispositifs d'isolement pour les circuits dont les charges calorifiques ne sont pas considérées doit être étudiée en détail.

C – PREVENTION DES ACCIDENTS ET CARACTERISTIQUES DE SURETE DE LA TRANCHE

C.1 - Réduction des fréquences des évènements initiateurs

L'objectif de réduction des fréquences des événements initiateurs - comme demandé dans la section **A.1.2** - implique d'évaluer l'expérience d'exploitation pour augmenter, autant que possible, la fiabilité des systèmes et équipements d'exploitation (par exemple le système d'alimentation normale en eau des générateurs de vapeur) et d'éliminer aussi largement que possible l'apparition de phénomènes pouvant mettre en cause l'intégrité des équipements mécaniques comme les vibrations, la corrosion, la cavitation...

Le retour d'expérience montre notamment que des dispositions adéquates doivent être mises en œuvre pour maîtriser les phénomènes de fatigue thermique liés au mélange de fluides chauds et froids. Leur adéquation doit être justifiée.

Des dispositions de conception permettant de réduire les fréquences des événements initiateurs doivent être considérées pour tous les types d'événements qui contribuent à la fréquence totale de fusion du cœur. Il est important de considérer les événements initiateurs pour tous les états d'exploitation, incluant la pleine puissance, la faible puissance, et tous les états d'arrêts pertinents.

La qualité de la conception, de la fabrication, de la construction, de l'exploitation et de la maintenance doit garantir que les dysfonctionnements conduisant à la mise en service de fonctions de sûreté sont peu probables.

C.2 - Redondance et diversification

C.2.1 - Critère de défaillance unique et maintenance préventive

Un système est conçu selon le critère de défaillance unique s'il est capable de remplir sa fonction en dépit d'une défaillance unique indépendante de l'événement dont la maîtrise nécessite le fonctionnement du système. La défaillance unique postulée peut être active à court et à long termes ou passive à long terme (après 24 heures).

Une défaillance unique active est définie comme une défaillance ou une erreur de position suffisante pour empêcher un équipement d'accomplir une fonction de sûreté attendue. Une telle défaillance peut avoir les caractéristiques suivantes :

- a) dysfonctionnement d'un équipement mécanique ou électrique qui suppose un mouvement mécanique pour accomplir la fonction attendue à la demande (par exemple fonctionnement d'un relais, démarrage d'une pompe, défaillance d'une vanne à l'ouverture ou à la fermeture, etc...),
- b) dysfonctionnement d'un équipement de contrôle-commande.

Les conséquences de mises en service intempestives d'équipements dues à des défaillances uniques dans les systèmes de contrôle-commande doivent en particulier être étudiées pour identifier les points faibles, s'il y en a, dans la séparation des équipements redondants et dans les systèmes de contrôle-commande (comme détaillé dans la partie **G.3**).

Certaines défaillances actives uniques peuvent être exclues lors de l'application du critère de défaillance unique pour la conception des systèmes ; de telles exclusions doivent être clairement justifiées par des méthodes appropriées en relation avec des dispositions de conception et d'exploitation précises, tenant compte de l'expérience d'exploitation. Les justifications devraient inclure une analyse des conséquences de la défaillance avec des hypothèses réalistes.

De telles exceptions pourraient inclure :

- a) la défaillance à l'ouverture des clapets des accumulateurs,
- b) la défaillance à la fermeture d'une vanne d'isolement des tuyauteries de vapeur principale en cas de rupture d'un ou plusieurs tubes de générateurs de vapeur (le comportement de la ligne de vapeur principale remplie d'eau et la quantité de réfrigérant primaire perdue doivent être précisées de même que les conséquences radiologiques possibles).

Une défaillance unique passive est définie comme une défaillance qui apparaît dans un équipement qui n'a pas besoin de changer d'état pour réaliser sa fonction. Une défaillance passive peut être :

- une fuite de l'enveloppe sous pression d'un système de fluide ; une telle fuite est, si elle n'est pas détectée et isolée, supposée s'accroître jusqu'au débit correspondant à une rupture totale ;
- une autre défaillance mécanique mettant en cause la ligne de débit correspondant au fonctionnement normal d'un système de fluide.

La prise en compte des défaillances passives seulement pour le long terme (après plus de 24 h) de fonctionnement des systèmes de sûreté, avec un taux de fuite supposé conventionnellement égal à 200 litres par minute jusqu'à l'isolement de la fuite, est acceptable en principe. Cependant, pour chaque système F1, des études de sensibilité doivent être réalisées pour montrer que le cas d'une défaillance unique passive à court terme (avant 24 h) de même que le cas d'un taux de fuite plus grand que 200l/mn (jusqu'à la rupture d'une tuyauterie connectée d'un diamètre intérieur de 50 mm) sont couverts par la prise en compte des défaillances uniques actives ou ne conduisent pas à un effet falaise pour ce qui concerne l'efficacité du système ainsi que les conséquences radiologiques. De plus, les fuites possibles à court terme doivent être considérées pour tous les barillets passifs.

En tout état de cause, le concepteur doit indiquer précisément les mesures de prévention et de limitation des conséquences qu'il mettra en œuvre pour traiter les défaillances passives, y compris les dispositions relatives à la détection et à l'isolement des fuites de même qu'à la reprise¹⁵ de l'eau. Les exigences F1 (à l'exception possible de la redondance) doivent être appliquées aux dispositifs de détection et d'isolement correspondants.

La maintenance préventive est définie comme la mise hors service d'équipements à des moments définis indépendamment de l'apparition de défaillances. Pendant les périodes de maintenance préventive, les équipements concernés sont considérés indisponibles pour la fonction pour laquelle ils ont été conçus. Si la nature de la maintenance préventive est telle que le système peut être remis dans un état opérationnel dans un délai approprié permettant la réalisation de la fonction de sûreté en cas de demande, la partie du système doit être considérée comme disponible.

Si la maintenance préventive est réalisée au cours des périodes de temps où un système F1 peut être amené à fonctionner à la demande ou est en attente, cette maintenance doit être combinée avec l'application du critère de défaillance unique (au niveau du système pour les systèmes F1A, au niveau de la fonction pour les systèmes F1B), en tenant compte de la capacité nécessaire pour la fonction de sûreté correspondante pendant la situation correspondante. Pour chaque système de sûreté pour lequel des essais périodiques seront réalisés sur un train pendant la maintenance préventive d'un autre train, des mesures appropriées doivent être prises pour éviter l'indisponibilité d'un train d'un système de sûreté pendant les tests.

Des interconnexions entre les trains d'alimentation en courant électrique alternatif de puissance ne devraient être permises que pour la maintenance et seulement entre deux des quatre trains (trains 1 et 2 d'un côté, trains 3 et 4 de l'autre côté). Pendant le fonctionnement en puissance, la maintenance ne devrait pas être réalisée sur plus d'un train au même moment.

C.2.2 – Etude probabiliste de sûreté et diversification

Les possibilités de défaillances de cause commune doivent être éliminées autant que possible par une conception et des règles d'installation des équipements adéquates, incluant par exemple le choix d'équipements diversifiés. Il faut noter que, pour des événements initiateurs fréquents, l'exigence de fiabilité d'une fonction de sûreté est tel que deux systèmes ou équipements diversifiés pourraient s'avérer nécessaires.

¹⁵ Le concepteur devrait développer une approche pragmatique des taux de fuite associés aux défaillances passives (incluant les défaillances possibles de petites tuyauteries), fondée sur la recherche des localisations sensibles, et en tenant compte du retour d'expérience existant.

Pour déterminer la combinaison adéquate de redondance et de diversification des systèmes de sûreté, le concepteur peut, comme indiqué dans la section **A.2.6**, utiliser des objectifs probabilistes en tant que valeurs d'orientation ; dans ce cas, des valeurs d'orientation de 10^{-6} par an pour les probabilités de fusion du cœur due aux événements internes respectivement pour les états en puissance et les états d'arrêt pourraient être utilisées, en gardant à l'esprit la nécessité de considérer les incertitudes associées.

Pour la réalisation des études probabilistes de sûreté, la liste des événements initiateurs doit être aussi complète que possible, même pour la première étude au stade de la conception ; elle doit au moins traiter toutes les séquences déjà étudiées dans les études probabilistes de sûreté françaises, y compris les événements dans les états d'arrêt, même avec des estimations très grossières de leurs fréquences dans une première étape.

L'utilisation de modèles simplifiés et de données génériques de même que la limitation des calculs à une durée de 24 heures peuvent être suffisantes pour fournir des indications valables dans une première étape pour la conception des centrales électronucléaires de puissance de la prochaine génération. Néanmoins, même au stade de la conception, il serait approprié d'étudier des événements spécifiques qui pourraient survenir après 24 heures (par exemple le remplissage d'un réservoir) dans le but de montrer l'absence d'effet falaise. En particulier, une attention appropriée doit être portée aux agressions externes qui nécessiteraient de longs temps de fonctionnement pour certains systèmes.

Concernant les défaillances de cause commune, le concepteur doit considérer ce type de défaillances pour les parties de composants à l'intérieur d'un système et étudier les possibilités de défaillances de cause commune entre systèmes différents.

Il ne serait pas approprié d'exclure a priori les possibilités de défaillances de cause commune pour les équipements en fonctionnement continu et dans le même état de fonctionnement avant et pendant l'accident, ou pour les équipements appartenant à une large population de composants identiques exploités dans des conditions similaires. De telles exclusions doivent être traitées au cas par cas. En particulier, des défaillances de fonctionnement de cause commune durant le temps nécessaire à la mission doivent être considérées pour des pompes identiques appartenant au même système et remplissant la même fonction dans les mêmes conditions, .

Les indisponibilités dues à la maintenance doivent être étudiées dès le début de la phase de conception, en particulier si des opérations de maintenance sont prévues tranche en puissance. L'influence possible d'erreurs humaines durant la maintenance et les essais doit être étudiée au stade de la conception. La maintenance préventive doit être considérée de manière réaliste ; les indisponibilités dues à la maintenance préventive ne devraient pas conduire à une part importante de la fréquence globale de fusion du cœur.

D'un autre côté, il est souligné que des délais maximaux de réparation avant l'arrêt du réacteur doivent être spécifiés pour les composants des systèmes de sûreté ; à cette fin, les études probabilistes peuvent aussi être utilisées, en tenant compte des valeurs d'orientation définies ci-dessus, avec une attention appropriée aux incertitudes associées. Les délais maximaux de réparation doivent aussi être cohérents avec « l'élimination pratique » des situations accidentelles qui conduiraient à des rejets précoces importants.

La fiabilité humaine est particulièrement difficile à traiter au stade de la conception, puisque les facteurs humains dépendent fortement des caractéristiques spécifiques d'exploitation des tranches qui ne sont pas définies à ce stade (procédures, organisation, ...). La première estimation peut n'être que très grossière. Il est à signaler qu'il n'est pas possible d'évaluer les avantages dus à l'amélioration des interfaces homme-machine sans des résultats expérimentaux. Un programme de recueil de données doit être défini dès que possible.

Les hypothèses, critères et données doivent être justifiés. Les données de fiabilité doivent être mises à jour et complètes, en considérant en particulier l'expérience d'exploitation française et allemande ; dans ce domaine, une attention particulière doit être portée aux défaillances de cause commune aussi bien qu'aux systèmes de contrôle-commande (matériels et logiciels). Les incertitudes concernant les données de fiabilité, les défaillances de cause commune et la fiabilité humaine doivent être traitées au stade de la conception en réalisant des études de sensibilité.

Le concepteur doit aussi évaluer soigneusement les fréquences des séquences conduisant à la fusion du cœur alors que le système d'évacuation de la chaleur hors de l'enceinte de confinement est indisponible et les conséquences correspondantes, en tenant compte des actions possibles des opérateurs. Les séquences avec des fuites initiales de l'enceinte de confinement doivent aussi être étudiées.

C.3 - Facteurs humains

Comme indiqué dans la section **A.2.3**, un programme complet d'ingénierie des facteurs humains doit être mis en œuvre. Les sujets suivants devraient être traités dans ce programme, selon un processus itératif autant que nécessaire :

- a) description et analyse des tâches : ceci couvrirait systématiquement les interactions entre les hommes et les équipements de même que les interactions entre hommes, pour toutes les activités d'exploitation, de maintenance, de réparation et de tests. Dans une première étape, les données seraient collectées de préférence par une observation directe de ces activités dans des tranches existantes, complétée par des interviews et plus tard par des essais sur des maquettes et des simulateurs ;
- b) allocation de fonctions aux équipements et aux hommes : ceci conduirait notamment à une liste justifiée de tâches à automatiser, à ne pas automatiser ou à partager dans une coopération homme-machine ;
- c) conception des interfaces : ceci couvrirait la définition des informations à présenter, leur organisation et leur mise en place, en particulier dans la salle de commande principale où une

vision globale de l'état réel de la tranche est nécessaire, le système d'alarmes, les moyens de communication pour les différents types d'activités, l'environnement de travail et les moyens de conduite à fournir aux opérateurs ; une attention particulière serait portée à la station de repli définie dans la partie **G.3** de même qu'aux autres emplacements de travail en dehors de la salle de commande principale;

- d) organisation des équipes de conduite : ceci couvrirait la définition du nombre requis et des compétences nécessaires pour le personnel, pour en déduire des critères de sélection et des programmes de formation, de même que l'organisation des équipes avec une claire répartition des responsabilités ;
- e) développement du "guidage" des opérateurs, incluant une documentation et des procédures adéquates ; des procédures informatisées devraient être développées d'une manière cohérente et intégrée avec les autres interfaces utilisées par les opérateurs ;
- f) vérification et validation : des ajustements devraient être mis en œuvre en fonction des résultats du processus de vérification et de validation tenant compte des évaluations de la fiabilité humaine dans toutes les phases de conception.

Un sujet spécifique concerne le système d'alarme pour lequel le concepteur doit considérer les situations de maintenance, de réparation et d'essais et définir des critères pour la hiérarchisation des alarmes à un stade précoce de la conception. Une telle hiérarchisation ne doit pas empêcher la possibilité de réaliser des tests de cohérence des alarmes qui apparaissent.

C.4 - Radioprotection des travailleurs et des personnes du public

C.4.1 - Radioprotection en exploitation normale

Pour la mise en œuvre de l'approche ALARA pour les tranches électronucléaires de puissance de la prochaine génération (comme demandé au paragraphe **A.2.7.1**), une évaluation détaillée du retour d'expérience existant est nécessaire.

Cette évaluation concernerait notamment :

- les débits de dose à proximité du système de refroidissement du réacteur pendant les arrêts, avec les contributions respectives des dépôts de produits de corrosion (^{58}Co , ^{60}Co , ^{124}Sb) ;
- les blindages dans le bâtiment du réacteur et les bâtiments auxiliaires.

Concernant le choix des matériaux, il serait judicieux, pour les tranches électronucléaires de puissance de la prochaine génération, de réduire autant que possible l'utilisation de stellites et d'antimoine et de sélectionner des matériaux ayant un faible taux d'impuretés de cobalt. Le choix de l'alliage des tubes des générateurs de vapeur doit aussi être justifié par le concepteur, en tenant compte du retour d'expérience relatif aux niveaux d'activité correspondants dans le système de refroidissement du réacteur de même que de la prévention de la corrosion du côté primaire et du côté secondaire.

Concernant les blindages, il serait approprié de retenir des valeurs d'activité de dimensionnement pour les produits de fission et les produits de corrosion dans le système de refroidissement du réacteur de manière plus réaliste que pour les tranches existantes, en considérant le retour d'expérience de façon appropriée. Ces activités, avec les spectres correspondants, doivent être spécifiées par le concepteur ; toutes les sources pertinentes d'irradiation doivent être prises en compte (rayonnements neutronique et gamma autour de la cuve du réacteur, ^{16}N autour du système de refroidissement du réacteur...).

Les points suivants doivent aussi être spécifiés par le concepteur :

- le taux de purification du réfrigérant primaire en exploitation normale et en arrêt à froid,
- les dispositions de conception prises pour éviter ou limiter autant que possible les zones où des dépôts de produits de corrosion pourraient s'accumuler,
- les traitements de surface (tels que le polissage électrolytique) appliqués à des parties du circuit primaire ou de la piscine du réacteur ,
- les dispositions considérées pour faciliter les opérations de décontamination,
- les dispositions de conception pour l'utilisation de robots,
- les dispositions de conception pour faciliter le travail dans le bâtiment de confinement, en réduisant les durées de travail et en accroissant les distances entre les sources radioactives et les travailleurs.

De plus, l'impact radiologique des tâches réalisées dans le bâtiment du réacteur pendant l'exploitation en puissance doit être précisément étudié par le concepteur.

C.4.2 – Effluents radioactifs, réduction des déchets et démantèlement

C.4.2.1 - Réduction des déchets et démantèlement

Le concepteur doit préciser comment il prendra en compte l'objectif de réduction des effluents et des déchets radioactifs indiqué au paragraphe **A.2.7.2** dans le cadre d'un processus d'optimisation. Ceci implique une évaluation détaillée du retour d'expérience existant. Les points suivants doivent notamment être traités :

- les spécifications des matériaux pour les composants qui sont en contact avec le réfrigérant primaire ;
- la chimie du réfrigérant du réacteur (avantages et inconvénients de modifications possibles de cette chimie) ;
- les dispositions permettant de réduire les dépôts de produits de corrosion qui sont ou peuvent être activés par leur passage à travers le cœur du réacteur ; ceci s'applique en particulier aux dépôts sur les assemblages de combustible et les structures entourant le cœur du réacteur ;
- les procédés de traitement des effluents radioactifs liquides et gazeux, de même que des déchets radioactifs solides en fonction des caractéristiques des différents types d'effluents et de déchets, en tenant compte des situations plausibles telles que les ruptures de gaines.

Certains choix de matériaux déjà demandés dans la section **C.4.1** pour des raisons de radioprotection (tels que la réduction autant que possible de l'utilisation de stellites et d'antimoine et le choix de matériaux avec un faible taux d'impuretés de cobalt) présenterait aussi des avantages pour ce qui concerne la gestion des déchets radioactifs. Un autre point relatif au choix des matériaux est la production de radionucléides à vie longue qui doit être considérée en relation avec le devenir ultime des déchets.

Il est aussi essentiel de faire une claire distinction au stade de la conception entre les zones à déchets conventionnels à l'intérieur desquelles les déchets produits ne sont pas susceptibles d'être contaminés ou activés et les zones à déchets nucléaires à l'intérieur desquelles les déchets produits sont susceptibles d'être contaminés ou activés ; l'extension des zones à déchets nucléaires devrait être minimisée par une conception adéquate.

Concernant le démantèlement, des dispositions adéquates doivent être mises en place au stade de la conception pour faciliter les travaux correspondants. En particulier, il serait judicieux d'installer les gros composants de telle manière qu'ils puissent être démontés et transportés en vue d'un traitement ultérieur ; il faut se soucier des moyens de manutention, des modalités d'évacuation et des protections biologiques nécessaires. De plus, des dispositions permettant le nettoyage et la décontamination in situ devraient être considérées lors de la conception et de l'installation des systèmes et des cuves.

C.4.2.2 - Systèmes de traitement des effluents

En relation avec l'objectif indiqué au paragraphe **A.2.7.2.** et rappelé dans la section précédente, le concepteur doit spécifier les points suivants relatifs aux systèmes de traitement des effluents :

- la politique de gestion des effluents radioactifs gazeux et liquides dans la tranche ;
- la méthode et les bases de données utilisées pour déterminer les flux de radioactivité à considérer (y compris le C^{14}) pour le dimensionnement des systèmes de traitement des effluents. Ces flux de radioactivité doivent couvrir tous les transitoires considérés pour la conception de la tranche (exploitation normale, y compris les arrêts de tranche et le suivi de charge, autres transitoires de référence). La gestion des effluents qui pourraient résulter des incidents et accidents de référence doit aussi être prise en compte ;
- la démonstration de l'identification de tous les rejets radioactifs et chimiques envisageables et le caractère adéquat de leur suivi.

D - MAITRISE DES TRANSITOIRES, INCIDENTS ET ACCIDENTS DE REFERENCE

D.1 – Liste des transitoires, incidents et accidents de référence

Comme indiqué dans la section **A.1.4**, des transitoires, incidents et accidents de référence affectant la tranche doivent être considérés pour démontrer la sûreté du réacteur.

La définition des transitoires, incidents et accidents de référence à étudier comprend plusieurs étapes :

- Identification des événements initiateurs possibles qui pourraient conduire à un relâchement de substances radioactives à l'intérieur ou à l'extérieur de la tranche;
- exclusion d'événements initiateurs simples qui font l'objet d'une prévention suffisante par des dispositions de conception et d'exploitation ;
- regroupement de tous les autres événements identifiés de manière à définir un nombre limité de transitoires, incidents et accidents de référence de telle sorte que les conséquences de chaque événement de référence enveloppent celles du groupe d'événements correspondant.

Une attention appropriée doit être portée aux transitoires, incidents et accidents de référence survenant dans les états d'arrêt, en tenant compte des conditions de fonctionnement spécifiques associées, notamment la possible indisponibilité de certaines des barrières et de certains des systèmes de sûreté. Une attention spécifique doit aussi être portée aux événements initiateurs qui pourraient conduire à un bipasse de la barrière constituée par l'enceinte de confinement, y compris des défaillances d'isolement dans les systèmes connectés au circuit primaire et traversant l'enceinte de confinement de même que les ruptures de tubes de générateurs de vapeur.

Il est approprié de classer les transitoires, incidents et accidents de référence selon les fréquences estimées des groupes d'événements initiateurs qu'ils enveloppent ; ceci implique la définition de quatre catégories de conditions de fonctionnement de référence de la tranche depuis l'exploitation normale et les transitoires jusqu'aux incidents et accidents. Pour chaque catégorie de conditions de fonctionnement de référence, la liste des événements initiateurs, les hypothèses, règles et critères associés doivent être précisés par le concepteur.

Pour la définition des événement initiateurs d'origine interne à considérer pour la tranche, il peut être utile de distinguer différents états du réacteur.

- État A état en puissance et état d'arrêt à chaud ou intermédiaire avec toutes les fonctions de protection automatique du réacteur disponibles ; certaines fonctions peuvent être désactivées à basse pression ;
- État B arrêt intermédiaire au dessus de 120°C, système de refroidissement à l'arrêt non connecté ; certaines fonctions de protection automatique du réacteur peuvent être désactivées ;
- État C arrêt intermédiaire et arrêt à froid avec le système de refroidissement à l'arrêt en fonctionnement et le circuit primaire fermé ou pouvant être refermé rapidement ;
- État D arrêt à froid avec le circuit primaire ouvert ;
- État E arrêt à froid avec la piscine du réacteur pleine ;

- État F arrêt à froid avec le cœur du réacteur complètement déchargé.

La liste des conditions de fonctionnement de référence à traiter dans la démonstration de sûreté des tranches électronucléaires de la prochaine génération peut être largement déduite de l'expérience des tranches existantes, en l'adaptant à la conception plus détaillée considérée comme acceptable dans les présentes directives techniques. Dans la liste préliminaire présentée ci-après, quand aucun état du réacteur n'est mentionné, la condition de fonctionnement correspondante doit être étudiée dans l'état A pour le niveau de puissance le plus pénalisant.

Exploitation normale : conditions de fonctionnement de catégorie 1 (PCC 1)

Les conditions d'exploitation normale incluent les situations qui sont maîtrisées par les systèmes d'exploitation, tels que la montée en température et le refroidissement du réacteur, les échelons de puissance, les rampes de montée en charge... Pour ces situations, la tranche est maintenue dans les limites définies par ses spécifications techniques (notamment pour ce qui concerne la disponibilité des systèmes et le nombre d'occurrences).

Transitoires de référence : conditions de fonctionnement de catégorie 2 (PCC 2)

- arrêt d'urgence (intempestif)
- dysfonctionnement du système d'alimentation en eau des générateurs de vapeur conduisant à une réduction de la température de l'eau d'alimentation,
- dysfonctionnement du système d'alimentation en eau des générateurs de vapeur conduisant à un accroissement du débit d'eau d'alimentation,
- accroissement excessif du débit de vapeur secondaire,
- déclenchement de la turbine,
- fermeture intempestive d'une vanne principale d'isolement de la vapeur ,
- perte du vide au condenseur,
- perte des alimentations électriques externes de courte durée (≤ 2 heures) (états A, C, D),
- perte du débit d'alimentation normale en eau des générateurs de vapeur (perte de toutes les pompes principales d'alimentation en eau et de la pompe du système de démarrage et d'arrêt),
- perte d'une pompe primaire principale sans arrêt d'urgence partiel,
- retrait incontrôlé d'un groupe de grappes de contrôle (état A),
- désalignement d'une grappe de contrôle, jusqu'à la chute de la grappe, sans tenir compte des dispositifs de limitation,
- démarrage d'une boucle primaire à l'arrêt à une température incorrecte,
- dysfonctionnement du système de contrôle volumétrique et chimique conduisant à une diminution de la concentration en bore du circuit primaire (états A à E),
- dysfonctionnement du système de contrôle volumétrique et chimique conduisant à une augmentation ou une diminution de l'inventaire en eau du circuit primaire,
- transitoire de pression primaire (aspersion intempestive dans le pressuriseur, chauffage intempestif du pressuriseur),
- abaissement incontrôlé du niveau d'eau dans le circuit primaire pendant un fonctionnement à mi-boucles (états C ou D),
- perte d'un train du système de refroidissement à l'arrêt pendant un fonctionnement à mi-boucles (états C,D).

Incidents de référence : conditions de fonctionnement de catégorie 3 (PCC 3)

- petite brèche d'une tuyauterie du système d'alimentation en eau des générateurs de vapeur ou d'une tuyauterie de vapeur,
- perte des alimentations électriques externes de longue durée (> 2 heures) (état A),
- ouverture intempestive d'une soupape de sûreté du pressuriseur,
- ouverture intempestive d'une ligne de décharge ou d'une soupape de sûreté d'un générateur de vapeur (état A),
- petite brèche primaire (états A, B),
- rupture d'un tube de générateur de vapeur (un seul tube),
- fermeture intempestive de toutes les vannes principales d'isolement de la vapeur,
- chargement et exploitation intempestifs d'un assemblage de combustible dans une position inappropriée,
- réduction forcée du débit primaire (4 pompes),
- défaillances dans les systèmes de traitement des effluents liquides ou gazeux,
- retrait incontrôlé d'un groupe de grappes de contrôle (états B à D),
- retrait incontrôlé d'une grappe ,
- rupture d'une ligne transportant du réfrigérant primaire en dehors de l'enceinte de confinement (par exemple ligne d'échantillonnage).

Accidents de référence : conditions de fonctionnement de catégorie 4 (PCC 4)

- perte des alimentations électriques externes de longue durée (> 2 heures) (état C),
- rupture d'une tuyauterie de vapeur (états A, B),
- rupture d'une tuyauterie d'alimentation en eau des générateurs de vapeur (états A, B)
- ouverture intempestive d'une ligne de décharge ou d'une soupape de sûreté d'un générateur de vapeur (état B),
- éjection d'une grappe de commande (états A, B),
- brèche intermédiaire ou grosse brèche du circuit primaire (jusqu'à la rupture de la ligne d'expansion du pressuriseur¹⁶ dans les états A et B),
- petite brèche primaire (jusqu'à un diamètre de 50 mm, dans les états C et D),
- brèche du circuit de refroidissement à l'arrêt à l'extérieur de l'enceinte de confinement (jusqu'à 250 mm de diamètre, dans les états C et D),
- grippage d'une pompe primaire (rotor bloqué),
- rupture d'un arbre de pompe primaire,
- rupture de deux tubes d'un générateur de vapeur,
- accident de manutention du combustible,
- dilution du bore due à une rupture non isolable d'un tube d'échangeur de chaleur (états A à E).

La liste définitive doit être complétée et justifiée par le concepteur en tenant compte des remarques suivantes :

¹⁶ Sans tenir compte de l'influence d'un limiteur de débit.

- si une condition de fonctionnement considérée en PCCn pour l'état en puissance est déclassée en PCCn+1 pour les états d'arrêt, ce déclassement doit être justifié au cas par cas sur la base de la fréquence estimée de l'événement initiateur dans les états d'arrêt ;
- les catégories de certaines conditions de fonctionnement telles que l'"ouverture intempestive d'une soupape de sûreté d'un générateur de vapeur (état A)" ou la "dilution du bore due à une rupture non isolable d'un tube d'échangeur de chaleur (états A à E)" doivent être justifiées précisément sur la base de la conception détaillée des équipements correspondants ;
- l'ouverture intempestive du dispositif de dépressurisation dédié (décrit au paragraphe **B.2.3.6**) doit être introduite dans la liste des conditions de fonctionnement à moins qu'une justification précise puisse être présentée ;
- les tailles des petites brèches primaires en PCC 3 doivent être spécifiées et justifiées ;
- le cas spécifique d'une petite brèche primaire à l'endroit le plus défavorable par rapport à l'injection par le système d'injection de bore supplémentaire, survenant en même temps qu'un aggravant unique sur le train non affecté de ce système, doit être étudié ;
- l'éjection d'une grappe de contrôle doit être considérée dans l'état C à moins que le concepteur ne fournisse des justifications adéquates ;
- l'approche pour les événements initiateurs internes survenant en dehors du bâtiment du réacteur, notamment dans la piscine du combustible usé, doit être précisée et justifiée (voir la partie **G.1**) ;
- concernant les bâtiments auxiliaires qui contiennent des systèmes avec des substances radioactives, des études d'accidents doivent être incluses dans les catégories de fonctionnement et menées avec les règles correspondantes. Dès lors que la disposition des systèmes dans ces bâtiments est telle que les lignes à haute énergie sont séparées de celles qui transportent de la radioactivité, la défaillance des équipements contenant de la radioactivité peut en principe être étudiée uniquement en tant qu'événement initiateur possible ;
- concernant les dilutions homogènes du bore dans le circuit primaire, les scénarios retenus pour les études d'accident, de même que leur classement dans les catégories de conditions de fonctionnement, doivent être justifiés sur la base d'une identification exhaustive des événements initiateurs pouvant être à l'origine d'une dilution, avec les débits correspondants, et une évaluation de leurs vraisemblances respectives ;
- l'exclusion des brèches intermédiaires du circuit primaire dans l'état B2 quand les accumulateurs sont isolés doit aussi être précisément justifiée ;
- un mode de fonctionnement avec seulement trois pompes primaires nécessiterait l'évaluation des études d'accident correspondantes.

Les études probabilistes de sûreté réalisées au stade de la conception devront aussi être utilisées pour vérifier et ajuster la liste présentée ci-dessus.

D.2 – Règles d'analyse de sûreté et critères d'acceptation

Pour les différents transitoires, incidents et accidents de référence, des règles doivent être appliquées pour la démonstration de sûreté et des critères techniques de découplage appropriés doivent être respectés avec des hypothèses conservatives. Pour certains transitoires, incidents et accidents de référence, le concepteur doit présenter des études d'accident couvrant toutes les gestions du combustible prévues.

Il doit être vérifié que, pour les différents transitoires, incidents et accidents de référence significatifs du point de vue radiologique, en supposant que les critères techniques correspondants sont respectés, les conséquences radiologiques sont tolérables et cohérents avec les objectifs généraux de sûreté définis dans la section **A.1.1** pour les accidents sans fusion du cœur.

D.2.1 - Règles d'analyse de sûreté

La démonstration de sûreté concernant les catégories de conditions de fonctionnement doit tenir compte des règles suivantes :

- en principe, seuls des systèmes F1 peuvent être utilisés dans la démonstration de sûreté pour atteindre et maintenir l'état d'arrêt sûr (tel que défini dans la section **B.2.1**) ; des équipements non F1 ne sont considérés que s'ils ne sont pas favorables pour le transitoire. Cependant, des exceptions très limitées pourraient être acceptées pour des équipements non F1 favorables pour un transitoire si des exigences appropriées sont appliquées à ces équipements. Le concepteur doit fournir une liste complète des équipements correspondants, avec les exigences associées, et la vérification de l'absence d'effet falaise quand ces équipements ne sont pas pris en compte dans la démonstration de sûreté ;
- l'aggravant le plus pénalisant doit être pris en compte. C'est une défaillance unique appliquée à un équipement utilisé pour réaliser la démonstration de sûreté, y compris un équipement non F1 tel que défini ci-dessus, s'il y en a. En particulier :
 - a) le blocage d'une barre de contrôle doit être considéré comme un aggravant possible pour les transitoires, incidents et accidents de référence. Dans la mesure où des dispositions adéquates sont mises en œuvre pour éviter tout blocage d'une barre de contrôle, en portant une attention appropriée au retour d'expérience existant, il n'est pas nécessaire de considérer la simultanéité du blocage d'une barre et d'un autre aggravant ;
 - b) la défaillance à la fermeture d'une vanne de décharge de vapeur principale doit être considérée comme un aggravant possible pour les transitoires de référence tels qu'une dilution homogène et le retrait incontrôlé d'une grappe de contrôle ;
- la maintenance préventive doit être combinée avec la prise en compte de l'aggravant le plus pénalisant, dans les conditions indiquées dans la section **C.2.1** ;
- une action manuelle depuis la salle de commande principale peut être supposée intervenir au plus tôt 30 minutes après la première information significative donnée aux opérateurs. Pour une action manuelle en local, en dehors de la salle de commande principale, le délai le plus court à retenir en compte est de une heure.

De plus, les transitoires, incidents et accidents de référence (à l'exception de ceux initiés par une action humaine), doivent être étudiés en supposant la perte des alimentations électriques externes au moment le plus défavorable ; seuls des équipements classés sismiques peuvent être utilisés pour la

démonstration de sûreté. Les critères techniques de découplage à respecter sont similaires à ceux des accidents de référence.

D.2.2 - Critères d'acceptation

Les critères techniques de découplage à respecter dans la démonstration de sûreté sont notamment les suivants.

Pour les transitoires de référence (PCC 2), l'intégrité des gaines du combustible doit être maintenue. Ceci implique de définir une limite pour le rapport d'échauffement critique, à préciser par le concepteur, et, éventuellement, un critère concernant l'interaction pastille-gaine.

L'appréciation des conséquences d'accidents de réactivité tels que le retrait incontrôlé d'une grappe de contrôle sur le comportement du combustible nécessite des investigations détaillées tenant compte des caractéristiques précises du combustible et du taux de combustion associé.

Pour la rupture de la ligne d'expansion du pressuriseur dans l'état A (PCC 4), la température du point chaud des gaines doit rester inférieure à 1200°C, l'oxydation maximale des gaines doit rester inférieure à 17% de l'épaisseur des gaines, la quantité d'hydrogène maximale produite doit rester inférieure à 1 % de la quantité qui serait produite si toute la partie active des gaines réagissait. Il est aussi nécessaire d'éviter que subsistent pendant une longue durée des conditions de refroidissement du cœur dégradées qui pourraient conduire à un endommagement important du combustible.

D'autres critères techniques de découplage devront être proposés et justifiés par le concepteur, concernant :

- l'énergie maximale déposée dans le combustible lors de transitoires rapides tels que l'éjection d'une grappe de contrôle (PCC 4),
- la possibilité de refroidir le cœur du réacteur à long terme après un accident de perte de réfrigérant primaire,
- les nombres maximaux de crayons de combustible pouvant subir un échauffement critique dans les conditions de fonctionnement des catégories 3 et 4,
- la température maximale des gaines au point chaud lors de transitoires rapides permettant d'éviter la fragilisation des gaines,
- la quantité maximale de combustible fondu dans les conditions de fonctionnement des catégories 3 et 4.

En outre, l'analyse de sûreté des transitoires, incidents et accidents de référence selon les règles associées doit inclure une évaluation de la protection contre les surpressions des circuits primaires et secondaires avec des critères spécifiques appropriés.

Plus généralement, il doit être vérifié que les règles de conception appliquées aux équipements classés utilisés dans la démonstration de sûreté enveloppent avec des marges appropriées les conditions (notamment les sollicitations des équipements mécaniques) résultant des transitoires, incidents et accidents de référence.

L'évaluation de sûreté des transitoires, incidents et accidents de référence doit aussi inclure une justification précise du volume des réservoirs du système d'alimentation de secours en eau des générateurs de vapeur en tenant compte de façon appropriée d'un aggravant et de la stratégie de maintenance préventive.

De plus, les exigences de sous-criticité relatives aux états d'arrêt doivent être définies en tenant compte des conditions accidentelles qui pourraient avoir lieu dans ces états.

D.2.3 - Utilisation de codes de calcul

Pour chacun des codes de calcul utilisés pour justifier la conception, le concepteur doit préciser sa validation expérimentale et sa qualification et comment les incertitudes restantes sont prises en compte (par exemple études de sensibilité). Ceci s'applique aux codes de calcul utilisés pour les calculs neutroniques et thermohydrauliques relatifs aux transitoires, incidents et accidents de référence, et notamment aux codes de calcul de nouvelle génération (codes de calcul couplés thermohydraulique et neutronique 3 D), de manière à démontrer que les valeurs enveloppes déterminées par les résultats sont réellement conservatives pour l'ensemble complet des études relatives aux conditions de fonctionnement PCC. Ceci s'applique aussi aux codes de calcul utilisés pour déterminer la l'évolution de la puissance résiduelle pour les études des conditions de fonctionnement.

Des hypothèses et modèles réalistes peuvent être utilisés pour la démonstration de sûreté relative à la rupture de la ligne d'expansion du pressuriseur dans l'état A (PCC 4) ; mais la conformité des résultats avec les critères d'acceptation doit être prouvée avec un haut niveau de confiance - ce qui implique l'utilisation d'une version figée du code de calcul, qui doit être qualifiée et vérifiée, et une évaluation explicite des incertitudes associées, en combinant les incertitudes élémentaires (modèles du code, effets d'échelle, conditions initiales et conditions aux limites, effets de l'utilisateur, ...). Une autre approche pourrait être l'utilisation de modèles et critères déjà appliqués à des tranches existants de manière conservative.

Des essais supplémentaires ou une réévaluation d'essais antérieurs pourrait être nécessaire pour des caractéristiques de conception différant de caractéristiques existantes de manière à réduire les incertitudes ; ceci doit être considéré en relation avec l'utilisation d'analyses réalistes.

D.2.4 - Conséquences radiologiques

Les conséquences radiologiques envisageables doivent être calculées comme indiqué dans la section **A.1.4**. Les hypothèses réalistes utilisées pour les calculs doivent être justifiées par le concepteur ; ceci s'applique au spectre de radionucléides considéré pour le calcul des doses et à l'activité des produits de fission dans le réfrigérant primaire (qui doit être déterminée en tenant compte des spécifications techniques d'exploitation) aussi bien qu'à l'entraînement d'iode considéré pour les ruptures de tubes de générateurs de vapeur.

Des conséquences radiologiques doivent en particulier être calculées pour les situations accidentelles dans les états d'arrêt, y compris une rupture guillotine du système de refroidissement à l'arrêt à

l'extérieur du bâtiment de confinement de même que pour les situations accidentelles avec une circulation de fluides contaminés de longue durée à l'extérieur du bâtiment de confinement.

Les résultats finals de l'étude des transitoires, incidents et accidents de référence significatifs du point de vue radiologique doivent comprendre les doses efficaces pour les membres des groupes critiques de même que la contamination possible des aliments. Il est en particulier souligné que les doses équivalentes à la thyroïde pour les adultes et les enfants sont des indicateurs importants des conséquences radiologiques de certaines situations accidentelles. Les doses résultant de l'ingestion de nourriture contaminée et du dépôt de substances radioactives doivent être présentées pour différentes distances et différentes durées.

Dans une première approche, les hypothèses suivantes peuvent être retenues pour la plus grosse brèche primaire à l'intérieur de l'enceinte de confinement :

- taux de rupture de gaine : 10% (cette valeur nécessite des justifications, en tenant compte de la composition et du taux de combustion du combustible),
- taux de fuite de l'enceinte de confinement interne : 1% par jour du volume libre de l'enceinte interne de confinement (sans fuite directe vers l'extérieur),
- efficacité des filtres de l'espace entre enceintes : 1000 pour l'iode moléculaire et les aérosols, 100 pour l'iode organique.

De plus, de manière générale, une étude de sensibilité concernant les conséquences radiologiques des situations accidentelles conduisant à des rejets dans le bâtiment du réacteur doit être réalisée en supposant une petite fuite de l'atmosphère du bâtiment du réacteur vers un bâtiment périphérique, en tenant compte de l'étanchéité et de la capacité de rétention de ce bâtiment périphérique.

E – MAITRISE DES CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT AVEC DEFAILLANCES MULTIPLES ET DES ACCIDENTS AVEC FUSION DU COEUR

E.1 - Conditions de fonctionnement avec défaillances multiples

E.1.1 – Prise en compte dans la démonstration de sûreté

En plus des transitoires, incidents et accidents de référence, des conditions de fonctionnement avec défaillances multiples doivent être considérées dans la démonstration de sûreté.

Une liste de conditions de fonctionnement avec défaillances multiples, dénommées RRC-A¹⁷, à étudier de manière déterministe en vue de prendre des dispositions supplémentaires de conception, est présentée au paragraphe **E.1.2.1**. Les résultats des études probabilistes de sûreté faites au stade de la conception devront être utilisées pour vérifier et ajuster la liste préliminaire des conditions de fonctionnement avec défaillances multiples et pour vérifier le caractère approprié des dispositions supplémentaires prévues.

E.1.2 - Analyse déterministe des conditions de fonctionnement RRC-A

E.1.2.1 - Liste des RRC-A

La liste ci-après de conditions de fonctionnement avec défaillances multiples à traiter dans la démonstration de sûreté des tranches électronucléaires de la prochaine génération est déduite de l'expérience des tranches existantes, adaptée au concept plus précis considéré comme acceptable dans les présentes directives techniques. Quand aucun état du réacteur n'est mentionné, cela signifie que la condition de fonctionnement correspondante doit être étudiée dans l'état A pour le niveau de puissance le plus pénalisant.

Conditions de fonctionnement avec défaillances multiples : Catégorie de Réduction du Risque A (RRC-A)

- perte totale des alimentations électriques : perte des alimentations électriques externes cumulée à la défaillance des 4 diesels principaux (état A et exploitation à mi-boucles dans l'état C ou D),
- perte des systèmes de refroidissement intermédiaire et d'eau brute secouru (état A et exploitation à mi-boucle dans l'état C ou D),
- perte totale de l'alimentation en eau des générateurs de vapeur (perte du système d'alimentation principale en eau, du système de démarrage et d'arrêt et du système d'alimentation de secours),
- petite brèche primaire (jusqu'à 50 mm de diamètre) et perte des trains du système d'injection de sécurité à moyenne pression (perte des pompes ou perte du refroidissement partiel du secondaire) (états A et C)

¹⁷ Catégorie de Réduction du Risque

- petite brèche primaire (jusqu'à 50 mm de diamètre) et perte du système d'injection de sécurité à basse pression (états A et C)
- petite brèche primaire et perte simultanée des systèmes de refroidissement intermédiaire et d'eau brute secourue,
- transitoires avec défaillance de l'arrêt d'urgence,
- rupture de plusieurs tubes de générateurs de vapeur (jusqu'à 10 tubes dans un générateur de vapeur),
- rupture d'une tuyauterie de vapeur et rupture simultanée de tube de générateur de vapeur (jusqu'à un tube dans le générateur de vapeur affecté),
- rupture de tube de générateur de vapeur (un tube) avec la ligne de décharge de vapeur du générateur de vapeur affecté bloquée ouverte,
- perte totale du système de refroidissement de la piscine du combustible usé.

E.1.2.2 - Investigation de séquences spécifiques

- 1/ Concernant les transitoires avec défaillance de l'arrêt d'urgence, les situations considérées dans la démonstration de sûreté doivent être justifiées précisément, en relation avec les résultats des études probabilistes de sûreté. Le concepteur doit justifier le conservatisme des coefficients de réactivité utilisés dans les études correspondantes.
- 2/ Des investigations détaillées sont particulièrement nécessaires concernant :
 - la rupture d'un tube de générateur de vapeur combinée avec le blocage en position ouverte d'une ligne de décharge de vapeur principale (en considérant le cas de l'attente à chaud et la localisation de la rupture de tube) ;
 - la petite brèche primaire combinée avec la perte du système d'injection de sécurité à basse pression (sous-criticité à l'arrêt à froid, formation de bouchons d'eau insuffisamment borée, colmatage, évacuation à long terme de la chaleur du réservoir d'eau interne à l'enceinte de confinement) ;
 - la petite brèche primaire combinée avec la perte du système d'injection de sécurité à moyenne pression (calculs relatifs à la sous-criticité du cœur, impact du refroidissement rapide du secondaire sur les structures des circuits primaire et secondaire) ;
 - la perte totale du système de refroidissement de la piscine du combustible usé, pour laquelle les conditions ambiantes dans le bâtiment correspondant et leur impact sur les structures et systèmes situés dans ce bâtiment, de même que les possibilités de fournir un appoint d'eau ou de réparer les composants défaillants doivent être complètement analysés. Des dispositions complémentaires doivent être mises en place autant que nécessaire notamment pour ce qui concerne les systèmes supports.

E.1.2.3 - Règles d'analyse des accidents et critères d'acceptation

Pour l'analyse des conditions de fonctionnement avec défaillances multiples, tous les systèmes peuvent être supposés disponibles, à l'exception de ceux qui sont supposés défaillants dans la combinaison de défaillances multiples. Ni défaillance supplémentaire ni indisponibilité due à la maintenance n'ont à être postulées de façon déterministe dans les systèmes nécessaires pour atteindre l'état final tel que défini dans la section **B.2.1**.

De plus, pour les conditions de fonctionnement avec défaillances multiples, les critères techniques de découplage relatifs aux accidents de référence peuvent être utilisés pour démontrer l'intégrité des barrières.

En particulier, l'analyse de sûreté des conditions de fonctionnement RRC-A selon les règles associées doit inclure un examen de la protection contre les surpressions des circuits primaire et secondaire avec des critères spécifiques adéquats.

Pour les transitoires avec défaillance de l'arrêt d'urgence, la pression primaire maximale ne doit pas excéder 1,3 fois la pression de dimensionnement pour toute configuration du cœur.

Il est souligné que, pour les conditions de fonctionnement RRC-A, y compris celles avec bipasse du confinement, les conséquences radiologiques calculées doivent être cohérentes avec l'objectif général mentionné dans la section **A.1.1** pour les accidents sans fusion du cœur. La méthode à appliquer pour la détermination des conséquences radiologiques possibles des conditions de fonctionnement RRC-A est similaire à celle appliquée aux transitoires, incidents et accidents de référence telle que décrite dans la section **D.2.4**. Les conséquences radiologiques doivent notamment être calculées pour la perte totale du système de refroidissement de la piscine du combustible usé.

E.1.3 - Etude probabiliste des conditions de fonctionnement avec défaillances multiples

Étant donné que les systèmes supports sont des contributeurs importants à la fréquence globale de fusion du cœur, une attention particulière doit être portée à ces systèmes. Ceci concerne notamment :

1. les séquences des études probabilistes de sûreté associées à une perte des alimentations électriques externes :
 - les possibilités de perte de longue durée des alimentations électriques externes (qui peuvent dépendre du site) doivent être examinées précisément. Si retenir une durée maximale de 24 heures est convenable au stade de la conception, à un stade ultérieur, le concepteur devrait identifier clairement les événements initiateurs qui pourraient conduire à une perte des alimentations électriques externes de longue durée ;
 - en raison des incertitudes relatives au délai de découverture du cœur en cas de perte des alimentations électriques externes dans l'état D, la situation de perte des alimentations électriques externes dans l'état D suivie de la défaillance des quatre diesels principaux doit être examinée précisément en tenant compte des dispositions mises en œuvre pour faire face à cette situation ;
 - les valeurs de fiabilité attendues pour les diesels et l'indépendance entre les deux types de diesels doivent être justifiées ;
 - les dispositions prises pour maintenir l'intégrité des joints des pompes primaires à long terme doivent être justifiées ;
 - l'autonomie des bâches du système d'alimentation de secours en eau des générateurs de vapeur doit être vérifiée avec soin pour toutes les chronologies de défaillances ; une probabilité de défaillance de leur réalimentation devrait être introduite dans les séquences correspondantes.

2. les séquences des études probabilistes de sûreté associées à la perte des chaînes de refroidissement :

- les possibilités de perte de longue durée de la source froide ultime (qui peuvent dépendre du site) doivent être examinées ;
- en raison des incertitudes relatives à la récupération de la source froide ultime avant que les conditions dans l'enceinte de confinement et le réservoir d'eau interne à cette enceinte puissent atteindre des valeurs trop élevées dans l'état D, la situation de perte de la source froide doit être évaluée précisément (en tenant compte des dispositions correspondantes qui peuvent dépendre du site) ;
- l'efficacité de la diversification du refroidissement de deux pompes du système d'injection de sécurité à basse pression par l'eau glacée refroidissant les systèmes de contrôle-commande doit être justifiée.

Une attention appropriée doit également être portée :

- à la fréquence et aux conséquences d'une perte totale du système de refroidissement de la piscine du combustible usé, avec une attention spécifique portée aux situations où le cœur est déchargé, en tenant compte des moyens qui pourraient être utilisés pour faire face à une telle défaillance et des dispositions spécifiques à mettre en place pendant la maintenance d'un train ;
- à toutes les causes possibles d'une chute intempestive du niveau d'eau dans le circuit primaire dans les états d'arrêt, en tenant compte de la conception détaillée du réacteur et des pratiques d'exploitation prévues ;
- concernant la perte totale d'alimentation en eau des générateurs de vapeur, à toutes les dépendances possibles entre le système de démarrage et d'arrêt et le système principal d'alimentation en eau.

E.2 - Dispositions de protection contre les accidents avec fusion du cœur

E.2.1 - Objectifs de sûreté

Comme indiqué dans la section **A.1.1**, les situations accidentelles avec fusion du cœur qui conduiraient à des rejets précoces importants doivent être pratiquement éliminées. Les séquences de fusion du cœur à basse pression doivent être traitées de telle sorte que les rejets concevables maximaux associés ne nécessiteraient que des mesures de protection très limitées en termes d'étendue et de durée pour les personnes du public.

Étant donné que, jusqu'à maintenant, l'expérience relative à la prise en compte des accidents graves dans la conception des réacteurs à eau pressurisée est limitée, les directives qui suivent sont plus détaillées que celles relatives aux transitoires, incidents et accidents de référence et aux conditions de fonctionnement avec défaillances multiples.

E.2.2 – Élimination pratique des séquences conduisant à des rejets précoces importants

E.2.2.1 - Prévention de la fusion du cœur à haute pression et de l'échauffement direct de l'enceinte de confinement

Comme indiqué dans la section **A.1.3**, un objectif de conception est de transférer avec une haute fiabilité les séquences de fusion du cœur à haute pression vers des séquences à basse pression de telle sorte que les situations de fusion du cœur à haute pression puissent être « exclues ».

Cet objectif implique de limiter la pression du circuit primaire dans la gamme 15 à 20 bar au moment de la rupture de la cuve du réacteur. Cet objectif peut être atteint en ajoutant à la fonction de dépressurisation des soupapes du pressuriseur, une vanne de décharge dédiée avec une vanne d'isolement telles que décrites dans le paragraphe **B.2.3.6**.

La capacité de décharge de la vanne dédiée doit être déterminée en considérant les situations suivantes, avec des hypothèses réalistes :

- perte des alimentations électriques externes et indisponibilité de tous les diesels ;
- perte des alimentations électriques externes et indisponibilité de tous les diesels mais avec retour d'un appoint d'eau pendant la fusion du cœur ;
- perte totale d'alimentation en eau des générateurs de vapeur combinée avec la défaillance du gavé-ouvert primaire¹⁸.

Cependant, des études de sensibilité relatives à la capacité de décharge, aux températures des gaz chauds et aux critères d'ouverture doivent être réalisées par le concepteur en considérant une décharge retardée et un renoyage tardif de même que les incertitudes des modèles de calcul relatifs à la phase de dégradation avancée du cœur ou au renoyage. Ces études de sensibilité aideront également à déterminer le moyen (manuel ou automatique) d'ouverture de la vanne dédiée, en tenant compte de la possibilité d'erreurs humaines au cours de l'accident.

La vanne dédiée et sa vanne d'isolement doivent être qualifiées pour des conditions représentatives. Des justifications expérimentales peuvent être nécessaires, en particulier pour les conditions qui diffèrent fortement des conditions de fonctionnement normales.

Par ailleurs, des dispositions de conception doivent être prises pour faire face aux chargements mécaniques qui résulteraient de la défaillance de la cuve du réacteur à 20 bar de manière à limiter le soulèvement vertical de la cuve du réacteur.

De plus, des dispositions de conception doivent être prises pour limiter la dispersion du corium dans l'atmosphère de l'enceinte de confinement dans le cas de la traversée de la cuve du réacteur, pour éviter « l'échauffement direct de l'enceinte de confinement ». Ces dispositions de conception sont relatives au puits de cuve et à sa ventilation ainsi qu'aux mesures neutroniques hors cœur, de façon à

¹⁸ Il est supposé que les soupapes du pressuriseur ne sont pas disponibles ; la vanne dédiée et sa vanne d'isolement restent disponibles.

assurer que de grandes quantités de corium provenant de la cuve du réacteur ne pourront pas être transportées hors du puits de cuve.

E.2.2.2 - Prévention des accidents d'injection rapide de réactivité

L'« élimination pratique » des accidents d'injection rapide de réactivité implique un examen détaillé de chaque scénario de dilution hétérogène, en considérant l'ensemble des lignes de défense pour ce scénario.

L'analyse pourrait comporter les trois étapes suivantes :

- un volume maximal des bouchons d'eau sans bore est défini sur la base de considérations neutroniques et thermohydrauliques relatives à la sous-criticité du cœur, indépendamment des scénarios réels de dilution ;
- ce volume maximal est utilisé pour définir des moyens déterministes permettant d'assurer que ce volume n'est pas dépassé pour chaque scénario réel de dilution ;
- une étude probabiliste de sûreté est utilisée pour vérifier que, pour chacun des scénarios réels de dilution, l'ensemble des dispositions mises en place apportent une défense en profondeur adéquate pour «éliminer pratiquement» les accidents de réactivité correspondants.

Concernant la première étape, les calculs relatifs aux phénomènes de mélange devraient être réalisés avec différents codes, en incluant des calculs de validation s'appuyant de préférence sur des expériences hydrauliques dans des installations d'essais à grande échelle.

Concernant la deuxième étape, tous les scénarios de dilution doivent être examinés précisément, y compris ceux résultant d'erreurs d'opérateurs, de dysfonctionnements de systèmes auxiliaires, de fuites de tubes de générateurs de vapeur de même que ceux concernant des réservoirs d'eau borée.

Il est souligné que la mise en place d'un basculement automatique classé F1A de l'aspiration des pompes de charge du système de contrôle volumétrique et chimique (RCV) au réservoir d'eau interne à l'enceinte de confinement en cas de détection d'un débit dilué par un boremètre unique F1A, composé d'une source de neutrons et de quatre détecteurs de flux, serait une mesure de conception positive pour limiter les conséquences des dilutions provenant des lignes RCV¹⁹. Cependant, la possibilité de classer le boremètre F1A doit être établie.

Des moyens adéquats doivent être définis par le concepteur pour « éliminer pratiquement » les scénarios de dilution hétérogène du bore via les échangeurs du système de refroidissement intermédiaire. En particulier, des exigences résultant des études correspondantes pourraient être fournies aux concepteurs des pompes en vue d'éviter la formation d'un bouchon d'eau borée diluée inadmissible dans les systèmes auxiliaires connectés via les dispositifs de refroidissement des joints de leurs pompes.

¹⁹ En outre, le concepteur doit examiner la possibilité d'utiliser le boremètre F1A conçu pour les dilutions hétérogènes pour prévenir les retours en criticité dus aux dilutions homogènes.

De plus, il est souligné que, dans le cas d'une perte totale des alimentations électriques alors que l'évacuation de la puissance résiduelle est assurée par les générateurs de vapeur fonctionnant en condensation à contre-courant, de l'eau faiblement borée pourrait s'accumuler dans le circuit primaire ; cette situation doit aussi être étudiée avec soin par le concepteur.

Il est aussi souligné que des concentrations élevées en bore en début de vie du cœur renforceraient l'attention à porter à l' « élimination pratique » des accidents de réactivité résultant d'une introduction rapide d'eau froide ou insuffisamment borée. Ces accidents de dilution du bore doivent être examinés en relation avec les marges de réactivité des systèmes d'arrêt.

Enfin, étant donné que des mécanismes de dilution intrinsèque apparaissent au cours de certaines situations accidentelles (par exemple le mode de transfert de la chaleur dans les générateurs de vapeur par ébullition et condensation en cas de brèche primaire, les débits inverses en cas de ruptures de tubes de générateurs de vapeur...), ces mécanismes et les codes correspondants doivent être complètement analysés, en considérant les phénomènes de mélange qui peuvent réduire les conséquences des bouchons d'eau insuffisamment borée. Certaines configurations nécessitent une attention particulière : injection simultanée de deux bouchons d'eau dans la cuve du réacteur, redémarrage de la circulation naturelle dans une boucle sans injection de sécurité, bouchons de faible densité pénétrant dans la cuve du réacteur. En particulier, des dispositions de conception telles que des verrouillages automatiques doivent être mises en œuvre pour toutes les conditions de fonctionnement PCC et RRC-A concernées de façon à exclure le redémarrage de pompes primaires après une dilution hétérogène intrinsèque significative.

E.2.2.3 - Prévention des explosions de vapeur

Phénomènes en cuve

Une libération importante d'énergie mécanique serait nécessaire pour mettre en danger la cuve du réacteur et l'enceinte de confinement ; néanmoins, le concepteur doit examiner les possibilités d'explosions de vapeur en cuve liées à la fusion du cœur. Une attention appropriée doit être portée :

- à la justification de la masse maximale de la zone de mélange, en tenant compte de la conception spécifique de la plaque inférieure de support du cœur et des incertitudes relatives à la relocalisation et au comportement du cœur dans le plénum inférieur ; dans ce cadre, les scénarios avec renoyage doivent être étudiés précisément ;
- à la transposition des résultats expérimentaux²⁰ à la conception spécifique des tranches électronucléaires de la prochaine génération ;
- à l'ordre de grandeur des élévations de température des structures internes supérieures et du couvercle de la cuve pendant les séquences de fusion du cœur et à leurs conséquences ;
- au comportement du circuit primaire (y compris les générateurs de vapeur) dans le cas d'un bouchon d'eau de forte énergie passant à travers le collecteur annulaire de la cuve à la suite d'une interaction eau-cœur fondu de forte énergie en cuve.

²⁰ Y compris les résultats de l'installation BERDA.

Phénomènes en dehors de la cuve

La quantité d'eau qui pourrait être présente dans le puits de cuve et dans la chambre d'étalement au moment de la percée de la cuve doit être limitée par conception. La possibilité d'une explosion de vapeur importante pendant le noyage du corium doit être évitée et les chargements résultant d'interactions eau-cœur fondu doivent être pris en compte dans la conception.

E.2.2.4 - Prévention des détonations d'hydrogène

Comme indiqué dans le paragraphe **B.1.4.1**, les possibilités de concentrations locales élevées d'hydrogène doivent être empêchées autant que raisonnablement possible par la conception des structures internes de l'enceinte de confinement. Quand il n'est pas possible de démontrer que la concentration locale d'hydrogène reste en dessous de 10%, des critères spécifiques²¹ pourraient être utilisés, pour autant qu'ils soient complètement justifiés et validés, pour démontrer l'absence de transitions déflagration-détonation et de déflagrations rapides ; dans le cas contraire, des dispositions adéquates doivent être mises en place telles que des parois renforcées des compartiments correspondants et de l'enceinte de confinement.

Une approche systématique et déterministe doit être réalisée par le concepteur pour la sélection des scénarios pertinents en termes de débits de relâchement d'hydrogène, en tenant compte des moyens de limitation des conséquences et il doit être prouvé que les scénarios sélectionnés sont enveloppes.

Concernant les moyens de limitation des conséquences, un concept utilisant uniquement des recombineurs sans mise en place d'igniteurs, avec une décharge directe du circuit primaire dans l'enceinte de confinement par l'intermédiaire d'un grand réservoir de décharge du pressuriseur avec deux lignes de décharge équipées de disques de rupture, les décharges étant dirigées vers les compartiments de deux pompes primaires, est acceptable en principe et doit pouvoir respecter les objectifs de sûreté mentionnés ci-dessus. Mais il doit être optimisé et la méthode de même que les outils utilisés pour la démonstration doivent être pleinement justifiés et validés.

Il est cependant souligné que des incertitudes significatives existent concernant la production d'hydrogène pendant les séquences d'accident grave ; ces incertitudes sont essentiellement liées à des phénomènes tels que le renoyage tardif d'un cœur partiellement endommagé à haute température, la coulée de matériaux du cœur fondu dans l'eau restant dans le plenum inférieur de la cuve du réacteur et les interactions entre le corium et les matériaux sacrificiels. Ces incertitudes appellent des études avec des codes et des modèles variés.

Notamment, des scénarios avec renoyage passif ou actif de même que des scénarios caractérisés par des relâchements d'hydrogène à plusieurs endroits doivent être traités dans la démonstration de l'efficacité et de la robustesse du concept de limitation des conséquences liées à l'hydrogène.

Il est souligné que les conséquences sur l'inflammabilité du mélange de la décroissance de la pression partielle de la vapeur à la suite de la mise en service du système d'évacuation de la chaleur de

²¹ Tels que le critère 7λ et le critère σ .

l'enceinte de confinement doivent être précisément étudiées par le concepteur, en considérant différents instants de démarrage de ce système.

E.2.2.5 - Prévention des bippasses du confinement

Comme indiqué dans la section **A.1.3**, "les séquences accidentelles (de fusion du cœur) avec bippasse du confinement ... doivent être "pratiquement éliminées" par des dispositions de conception ... dans le but d'assurer un isolement fiable et aussi à prévenir les défaillances."

Concernant le système d'injection de sécurité à basse pression et de refroidissement à l'arrêt (ISBP/RRA), le suivi continu de la pression et de la température dans les portions de tuyauteries situées entre les premiers et les seconds clapets d'isolement du circuit primaire qui sont maintenues à la pression des accumulateurs, fournirait une surveillance effective de l'étanchéité de ces clapets. Néanmoins, pour "éliminer pratiquement " les fusions du cœur avec bippasse du confinement dû à une fuite réaliste significative à travers ces deux clapets d'isolement, le concepteur doit justifier la capacité des vannes d'isolement motorisées situées sur les lignes d'injection de sécurité à l'extérieur de l'enceinte de confinement à arrêter un débit inverse (qui pourrait être diphasique). En tout état de cause, les portions de tuyauteries du système ISBP/RRA à l'extérieur de l'enceinte de confinement jusque et y compris les vannes d'isolement motorisées doivent être dimensionnées de telles sorte que leur intégrité soit maintenue dans les conditions du fluide primaire.

L'importance pour la sûreté, pendant le fonctionnement d'un système de refroidissement à l'arrêt, de l'étanchéité du clapet situé à l'aspiration du réservoir d'eau interne à l'enceinte de confinement ainsi que du clapet du système d'injection de sécurité à moyenne pression à l'intérieur de cette enceinte doit être aussi soulignée. Une attention spécifique doit être portée à la fermeture de ces clapets après une séquence de basculement du mode injection de sécurité au mode refroidissement à l'arrêt, en tenant compte de la présence possible de particules dans le débit traversant chacun de ces clapets au cours de l'injection de sécurité. En tout état de cause, des dispositions adéquates doivent être mises en place pour garantir l'intégrité des parties concernées du système d'injection de sécurité à l'extérieur de l'enceinte de confinement en cas de fuite à travers ces clapets.

Des exigences de conception rigoureuses doivent être appliquées aux parties du système de refroidissement à l'arrêt extérieures à l'enceinte de confinement de manière à prévenir des ruptures importantes dans ces parties du système. En outre, la capacité des vannes d'isolement à se fermer doit être prouvée pour toutes les tailles de brèche (jusqu'à la brèche guillotine), y compris avec un débit diphasique²².

Concernant les brèches possibles des barrières thermiques des pompes primaires et du refroidisseur à haute pression du système de contrôle volumétrique et chimique, le concepteur doit justifier la taille de brèche maximale retenue de même que les dispositions mises en place pour la détection et l'isolement d'une telle brèche, même pour des conditions de débit diphasique.

²² Il est rappelé que la brèche guillotine de la plus grosse tuyauterie est un accident de référence (PCC 4).

Concernant les brèches possibles dans les échangeurs de chaleur du système ISBP/RRA, le concepteur doit aussi justifier la taille maximale de brèche retenue et évaluer les conséquences d'une telle brèche sur les circuits du système de refroidissement intermédiaire en termes de montée en pression et en température.

Pour ce qui concerne les séquences de fusion du cœur qui pourraient survenir pendant les états d'arrêt alors que le bâtiment de confinement est ouvert, le concepteur doit préciser les différentes phases des états d'arrêt pour lesquelles cette ouverture est autorisée. Il serait judicieux que l'enceinte de confinement soit maintenue fermée avec le système de mise en dépression de l'espace entre enceintes en fonctionnement au moins dans les états A, B et C (avec une température primaire supérieure à 70°C) de même que dans l'état D avant la phase de rechargement. Le côté secondaire des générateurs de vapeur serait également maintenu fermé et les dispositifs d'isolement de l'enceinte de confinement seraient opérationnels dans les mêmes phases des états A, B et C (avec une température primaire supérieure à 70°C) et dans l'état D avant la phase de rechargement. En tout état de cause, le concepteur doit montrer que, pour des séquences accidentelles représentatives, l'enceinte de confinement serait fermée de manière fiable avant que des relâchements radioactifs significatifs puissent intervenir à l'intérieur de l'enceinte de confinement ; comme indiqué dans le paragraphe **B.1.4.2**, cette exigence concerne notamment le tampon matériel.

Pour ce qui concerne les situations accidentelles de fusion du cœur avec une fuite significative des tubes des générateurs de vapeur (jusqu'à une rupture multiple de tubes de générateurs de vapeur), les situations suivantes doivent être étudiées : rupture simple ou multiple de tubes de générateurs de vapeur avec perte des systèmes nécessaires pour faire face à cette rupture, rupture simple ou multiple de tubes de générateurs de vapeur avec défaillance de la fermeture de la vanne d'isolement de vapeur principale correspondante, rupture d'une tuyauterie de vapeur avec fuites de tubes du générateur de vapeur associé, ouverture intempestive d'une soupape de sûreté secondaire avec des fuites de tubes du générateur de vapeur associé.

Étant donné que les séquences de fusion du cœur avec défaillances subséquentes de tubes de générateurs de vapeur doivent être "pratiquement éliminées", les scénarios conduisant à une circulation naturelle à travers les boucles primaires et les générateurs de vapeur doivent aussi être étudiés avec précision avec des codes validés adéquats.

E.2.2.6 - Prévention de la fusion du cœur dans la piscine du combustible usé

Dès lors que la piscine du combustible usé n'est pas située dans l'enceinte de confinement, il doit être démontré que les conditions de fusion du combustible usé dans la piscine sont "pratiquement éliminées". Cette démonstration doit considérer le cas d'un séisme.

E.2.3 - Limitation des conséquences des scénarios de fusion du cœur à basse pression

E.2.3.1 - Refroidissement du cœur fondu en dehors de la cuve

Concernant le radier de l'enceinte de confinement, les objectifs indiqués dans la section **A.1.3** pour les situations avec fusion du cœur à basse pression peuvent, comme mentionné dans le paragraphe **B.1.4.1**, être atteints par la mise en place d'une grande chambre d'étalement en impasse avec refroidissement du corium quand il est étalé sur cette grande surface. La grande chambre d'étalement serait séparée géographiquement du puits de cuve et protégée à l'égard des chargements thermomécaniques consécutifs à la défaillance de la cuve du réacteur. Des dispositions de conception empêcheraient l'arrivée dans cette chambre d'eau de condensation provenant de quelque partie que ce soit de l'enceinte de confinement. De plus, une porte d'acier séparerait physiquement le puits de cuve de la chambre d'étalement.

Dans ce concept, des couches de béton sacrificiel seraient mises en place dans le puits de cuve et dans la chambre d'étalement pour obtenir des caractéristiques adéquates du mélange fondu. La pénétration du radier serait évitée par une couche protectrice réfractaire recouverte d'une couche d'acier. Le refroidissement du mélange fondu serait assuré par le noyage de ce mélange par le dessus par de l'eau provenant du réservoir d'eau interne à l'enceinte de confinement. Les chargements thermiques sur le radier seraient limités par une épaisse plaque d'acier placée sous une couche protectrice (ZrO₂ réfractaire), avec des canaux de refroidissement reliés au système d'évacuation de la puissance hors de l'enceinte de confinement.

Jusqu'à maintenant, aucun système de codes validés ne peut décrire de manière fiable les phénomènes pour les séquences d'accident grave. Aussi, la conception du puits de cuve et de la grande chambre d'étalement, y compris le refroidissement du corium, doit être justifiée par le concepteur sur la base de résultats expérimentaux et de calculs associés, pour un large spectre de scénarios possibles.

Des expériences sont nécessaires pour étudier les différentes conditions d'étalement qui pourraient se produire (écoulement rapide, écoulement lent, écoulements successifs, formation locale de corium solidifié, formation d'une croûte...) et les possibilités d'interactions corium-eau hautement énergétiques de même que l'érosion de matériaux sacrificiels et son influence sur la composition du mélange fondu dans la chambre d'étalement. En particulier, il y a besoin d'expériences à effets séparés pour étudier les propriétés physico-chimiques et thermodynamiques du corium et des mélanges. Des essais d'étalement devraient aussi être réalisés avec des matériaux analogues au corium jusqu'à une échelle représentative, en tenant compte du concept réel de la chambre d'étalement, notamment, la mise en place de matériaux sacrificiels.

La robustesse du concept décrit ci-dessus devra être vérifiée pour différents scénarios, notamment des scénarios avec renoyage tardif et des scénarios avec une puissance résiduelle faible ; une attention spécifique doit être portée à l'ouverture de la porte (notamment à la possibilité d'une défaillance précoce ou partielle de la porte d'acier) de même qu'à l'optimisation de la conception du puits de cuve en termes de composition et de masses des couches de béton sacrificiel, et du canal de transfert entre le puits de cuve et la chambre d'étalement. Le comportement de la couche réfractaire doit aussi être validé en tenant compte des capacités des systèmes de refroidissement (notamment le flux critique) et des possibilités d'attaques thermo-chimiques par des oxydes de fer ou des oxydes de corium. Une attention spécifique doit aussi être portée aux conditions avec mélange liquide à long terme dans la chambre d'étalement et à la stabilité du système multicouches dans ces conditions.

E.2.3.2 - Refroidissement de l'enceinte de confinement sans éventage

La fonction de refroidissement de l'enceinte de confinement dans les conditions de fusion du cœur à basse pression peut être réalisée par un système assurant une aspersion dans l'enceinte de confinement et le refroidissement du corium, divisé en deux trains comme décrit dans le paragraphe **B.2.3.5**, avec une chaîne de refroidissement dédiée assurant une diversification par rapport au système de refroidissement intermédiaire utilisé pour les systèmes relatifs à la prévention de la fusion du cœur. La pressurisation de la chaîne de refroidissement dédiée au dessus de la pression de fonctionnement du système de refroidissement de l'enceinte assurerait l'absence de fuite de ce système vers la chaîne de refroidissement dédiée.

Une attention appropriée doit être portée aux sujets suivants :

a) les fuites possibles du système, notamment :

- la conception de la double enveloppe de la partie non isolable de la ligne d'aspiration du système d'évacuation de la chaleur de l'enceinte de confinement ainsi que la surveillance de cette ligne et de cette double enveloppe, en tenant compte des possibles effets de corrosion ;
- la conception des parties du système d'évacuation de la chaleur de l'enceinte de confinement qui sont installées en dehors de cette enceinte et des locaux dédiés correspondants, en relation avec la fiabilité des dispositifs de détection de fuite et d'isolement d'un train défectueux ;
- les conséquences d'une fuite dans les compartiments du système d'évacuation de la chaleur de l'enceinte de confinement (pression, température, humidité relative, irradiation, ...) avec le classement des équipements correspondants.

b) les possibilités de défaillances de cause commune du système d'évacuation de la chaleur de l'enceinte de confinement et des systèmes nécessaires pour prévenir la fusion du cœur, notamment :

- la perte de systèmes support communs : comme la fiabilité de la fonction d'évacuation de la chaleur pourrait être limitée par la fiabilité des systèmes supports, notamment les alimentations électriques et la source froide ultime, le concepteur doit, autant que nécessaire, étudier des améliorations dans le cadre des études spécifiques aux sites ;
- le bouchage des filtres du réservoir d'eau interne à l'enceinte de confinement : une information détaillée doit être fournie par le concepteur : caractéristiques de débit, volume et comportement des débris...

c) la fiabilité à long terme du refroidissement du corium dans la chambre d'étalement.

E.2.3.3 - Instrumentation

Il est souligné que, pour les conditions d'accident grave, une information pertinente est nécessaire non seulement pour les opérateurs mais aussi pour les équipes de crise. Une proposition détaillée doit être présentée par le concepteur avec des justifications adéquates.

E.2.3.4 - Qualification aux conditions des accidents graves

Comme indiqué au paragraphe **B.2.2.1**, les équipements nécessaires en cas d'accident grave doivent être qualifiés pour les conditions pour lesquelles ils sont nécessaires. Notamment, le comportement des traversées et celui de la peau d'étanchéité interne de l'enceinte de confinement doivent être étudiés autant que nécessaire, en tenant compte des différents phénomènes qui pourraient survenir au cours d'accidents graves, notamment des combustions d'hydrogène ; le concepteur doit définir le programme de qualification correspondant.

E.2.4 - Démonstration de sûreté

Des conditions d'accident grave doivent être étudiées dans la démonstration de sûreté des tranches électronucléaires de la prochaine génération. Des exemples de telles conditions sont :

- la perte des alimentations électriques externes cumulée avec l'indisponibilité de tous les diesels, c'est-à-dire la perte totale des alimentations électriques telle que définie dans les conditions de fonctionnement RRC-A combinée à l'indisponibilité des petits diesels,
- la perte totale de l'alimentation en eau des générateurs de vapeur (comme dans les conditions RRC-A) combinée à la défaillance du "gavé-ouvert" côté primaire^{18f},
- une petite brèche primaire avec perte totale du système d'injection de sécurité,
- une perte de réfrigérant primaire (jusqu'à la rupture de la ligne d'expansion du pressuriseur) avec défaillance complète du système d'injection de sécurité.

Cependant, les incertitudes relatives à certains des phénomènes qui pourraient survenir au cours des séquences d'accident grave appellent à considérer différents scénarios et à réaliser des études de sensibilité.

Pour chaque code de calcul utilisé pour justifier la conception, le concepteur doit préciser sa validation et sa qualification expérimentales et comment les incertitudes restantes sont prises en compte (par exemple études de sensibilité).

Concernant les chargements résultant d'une combustion d'hydrogène, avec le concept de limitation des conséquences décrit au paragraphe **E.2.2.4**, des effets dynamiques locaux dus à des phénomènes tels qu'une déflagration rapide ou une transition déflagration-détonation ne sont attendus que sur les structures internes du bâtiment de confinement ; des dispositions telles que des parois renforcées des compartiments correspondants doivent être mises en place autant que nécessaire.

Pour la paroi interne de l'enceinte de confinement, il doit aussi être démontré qu'en tenant compte des moyens de limitation des conséquences, et quel que soit le scénario choisi, le chargement de pression résultant d'une combustion d'hydrogène complète, adiabatique et isochore ne dépasse la pression de dimensionnement de l'enceinte de confinement à aucun moment.

Pour démontrer l'atteinte de l'objectif de sûreté pour les séquences de fusion du cœur à basse pression décrit dans la section **A.1.1**, les calculs des conséquences radiologiques envisageables devront utiliser des hypothèses et des paramètres réalistes.

En tant qu'étude de sensibilité, le cas d'une petite fuite du bâtiment du réacteur vers un bâtiment périphérique doit être étudiée en détail, en tenant compte de l'étanchéité du bâtiment concerné et de la rétention assurée par ce bâtiment.

F - PROTECTION CONTRE LES AGRESSIONS

F.1 - Protection contre les agressions internes

F.1.1 – Exigences générales

Comme indiqué dans la section **A.2.4**, les agressions internes à considérer dans la démonstration de sûreté comprennent :

- les défaillances de composants soumis à la pression,
- les inondations internes,
- les incendies,
- les explosions internes,
- les projectiles internes,
- les chutes de charge.

Les possibilités de défaillances de mode commun dues à des agressions internes peuvent être minimisées par l'installation des parties des trains des systèmes de sûreté qui sont en dehors du bâtiment de confinement dans des divisions conçues de telle sorte que même la perte totale d'une division due à une agression interne spécifique n'empêcherait pas l'accomplissement des trois fonctions de sûreté de base, en postulant une défaillance unique en cohérence avec les règles de la démonstration de sûreté appliquées aux transitoires, incidents et accidents de référence. Des dispositions d'installation doivent être spécifiées par le concepteur pour les équipements redondants des systèmes de sûreté non séparés par la disposition en divisions.

De plus, la démonstration de sûreté doit être faite pour chaque agression interne en supposant que tous les équipements non protégés affectés sont perdus et en considérant un aggravant unique et les premières actions des opérateurs selon les mêmes règles que pour les transitoires, incidents et accidents de référence. En principe, les agressions internes qui ne résultent pas de tels transitoires, incidents et accidents de référence ne devraient pas induire une condition de fonctionnement de la tranche qui rentrerait dans les catégories des incidents ou des accidents. Dans le cas contraire, le concepteur doit montrer que cette condition de fonctionnement de la tranche est enveloppée en termes de probabilité et de conséquences par l'étude des incidents et accidents de référence et des conditions de fonctionnement avec défaillances multiples de référence.

Les relations entre les agressions internes (telles que les inondations résultant de ruptures de tuyauteries ou les incendies résultant d'explosions) doivent être considérés dans la démonstration de sûreté de même que les agressions internes qui pourraient résulter d'agressions externes ou d'accidents graves (voir le paragraphe **F.2.2.1** pour les séismes).

F.1.2 - Exigences pour la conception des dispositions de protection contre les agressions internes

F.1.2.1 - Défaillances de tuyauteries, cuves, réservoirs, pompes et vannes

La conception et la disposition des tuyauteries, cuves, réservoirs, pompes et vannes doivent être fondées autant que possible sur le principe de séparation physique ou géographique de manière à empêcher l'aggravation d'un événement initial, en postulant notamment un aggravant en cohérence avec les règles appliquées pour les transitoires, incidents et accidents de référence, et à éviter les défaillances de cause commune dans les systèmes nécessaires pour atteindre et maintenir un état d'arrêt sûr. A cet égard :

- a) la disposition des tuyauteries primaires devrait être telle qu'une défaillance d'une boucle du circuit primaire n'induit pas une défaillance d'une autre boucle ;
- b) la disposition des tuyauteries primaires et secondaires devrait être telle qu'une défaillance du circuit primaire n'induit pas de défaillance du circuit secondaire et vice versa ;
- c) une défaillance d'une tuyauterie secondaire²³ ne devrait pas conduire à la dépressurisation simultanée de deux générateurs de vapeur,
- d) la dépressurisation d'un générateur de vapeur simultanément du côté eau et du côté vapeur devrait être évitée,
- e) les premières vannes d'isolement sur les circuits connectés devraient être situées au plus près des tuyauteries principales.

Les non conformités à ces règles doivent être justifiées.

Concernant les effets de défaillances de tuyauteries, cuves, réservoirs, pompes et vannes, pour les composants à haute énergie (composants des systèmes transportant de l'eau ou de la vapeur à une pression supérieure à 2,0 MPa ou à une température supérieure à 100°C en exploitation normale, composants transportant des gaz à une pression supérieure à la pression atmosphérique), les effets locaux à considérer comprennent des effets internes aux systèmes (forces liées aux ondes de pression et forces liées aux débits accrus) et des effets sur le voisinage des composants (effets de jets, forces de réaction, fouettements de tuyauteries). De plus, dans chaque cas, les effets globaux à considérer comprennent les inondations, les conditions ambiantes plus sévères et les effets de pressions différentielles sur les structures des bâtiments.

En plus de "l'exclusion" des ruptures guillotines des tuyauteries primaires principales et des tuyauteries secondaires principales comme indiqué dans les sections **B.1.2** et **B.1.3**, des ruptures pourraient être "exclues" de la démonstration de sûreté pour des cuves, réservoirs, pompes et vannes conçues, réalisées et exploitées avec des exigences de haute qualité ; Cependant une telle approche doit être clairement justifiée par le concepteur au cas par cas, en tenant compte de l'expérience d'exploitation des tranches existantes ; avec ces justifications, seules des fuites seraient étudiées. D'autres "exclusions" de ruptures pourraient être discutées pour des tuyauteries de diamètre intérieur de plus de 50 mm environ, conçues, réalisées et exploitées selon des exigences élevées de qualité et de surveillance quand ces tuyauteries sont exploitées à haute énergie moins de 2% de la vie du réacteur ; dans le cas où de telles "exclusions" de ruptures seraient justifiées, seules des fuites seraient retenues.

²³ Voir les brèches à retenir dans la section B.1.3.

Les localisations des ruptures ou fuites postulées de tuyauteries doivent être choisies en considérant non seulement les contraintes calculées dans les tuyauteries mais aussi les conséquences possibles des défaillances de tuyauteries à haute ou basse énergie dans chaque compartiment contenant de telles tuyauteries ; ceci doit notamment être appliqué aux traversées de l'enceinte de confinement.

De plus, des hypothèses appropriées doivent être proposées et justifiées par le concepteur concernant l'importance des fuites initiales à travers des fissures traversantes de tuyauteries, de brides et de pénétrations de pompes et vannes, ainsi que l'importance des fuites pouvant résulter de l'agression d'une tuyauterie ou d'un autre équipement par le fouettement d'une tuyauterie rompue.

F.1.2.2 - Inondations internes

Pour ce qui concerne les inondations, en complément aux ruptures et fuites de tuyauteries, cuves, réservoirs, pompes et vannes définies au paragraphe **F1.2.1**, des initiateurs possibles d'inondations tels qu'une erreur de lignage, une entrée d'eau provenant de bâtiments voisins, le fonctionnement erroné d'un système de lutte contre l'incendie, le débordement d'une bêche, l'ouverture de soupapes de sûreté, la défaillance ou le fonctionnement intempestif d'organes d'isolement... doivent être traités dans la démonstration de sûreté.

Tous les effets pertinents des inondations envisageables doivent être considérés y compris ceux d'une élévation du niveau d'eau pour les composants actifs et passifs dans la zone affectée, d'un accroissement de pression, de température, d'humidité ou des conditions de radioactivité ambiantes pour les équipements de la zone affectée, d'une aspersion pour les composants électriques, de relâchements d'acide borique, de même que les chargements en résultant sur les structures des bâtiments, y compris les portes et les sas. Les délais retenus pour les interventions nécessaires des opérateurs doivent être justifiés par le concepteur, en tenant compte des différentes sources d'inondation qui pourraient survenir simultanément et des conditions ambiantes sur les chemins d'accès.

En outre, éviter la contamination des eaux souterraines doit être un objectif de conception ; les dispositions correspondantes doivent être spécifiées et justifiées par le concepteur même pour le cas de l'inondation interne d'un bâtiment auxiliaire.

F.1.2.3 - Incendies

Selon le principe de "défense en profondeur", la protection contre l'incendie comprend la prévention, la détection et l'extinction des incendies (maîtrise des incendies) ainsi que la limitation des conséquences des incendies (non propagation des incendies). La priorité est donnée aux dispositions ayant pour but de limiter et d'isoler les charges calorifiques, de limiter la formation de fumées ainsi que d'éviter les sources d'ignition à proximité de matériaux combustibles ; ceci conduit à choisir des équipements et des fluides ininflammables ou difficilement inflammables autant qu'il est possible et approprié ; les sources d'ignition possibles doivent être clairement identifiées et étudiées.

Nonobstant les mesures de prévention, la protection contre l'incendie doit être fondée sur l'hypothèse qu'un feu peut se déclarer n'importe où dans l'installation et dans n'importe quelle condition

d'exploitation normale de celle-ci ; un seul feu doit être considéré à un instant donné . Une attention particulière doit être portée aux dispositions de protection contre l'incendie dans les états d'arrêt, y compris pendant les activités de maintenance. De plus, la protection contre les incendies qui pourraient se déclarer dans un état anormal de la tranche, en particulier dans des conditions d'arrêt post-accidentel, doit être définie par le concepteur.

Concernant la limitation des conséquences des incendies, la priorité doit être donnée, en premier lieu à la protection physique par des secteurs de feu, en second lieu à la séparation géographique par des zones de feu. Le maintien en position ouverte, dans les états d'arrêt, d'éléments de sectorisation liés à la sûreté doit être exceptionnel et faire l'objet d'une analyse au cas par cas, avec la définition de dispositions compensatoires appropriées. Cette exigence doit être prise en compte dès le stade de la conception.

L'analyse de sûreté des effets des incendies doit clairement identifier les possibilités de défaillances de mode commun qui pourraient résulter d'une séparation incomplète des équipements redondants nécessaires pour atteindre et maintenir un état d'arrêt sûr (y compris les risques d'inondation interne liés à l'utilisation des systèmes de lutte contre l'incendie) ; dans un tel cas, des dispositions complémentaires doivent être mises en place autant qu'il est nécessaire. Plus généralement, la défaillance fonctionnelle de tous les équipements autres que ceux disposant d'une protection justifiée de manière adéquate, doit être supposée à l'intérieur du secteur de feu ou de la zone de feu où l'incendie s'est déclaré.

De plus, les points suivants doivent être soulignés :

- le degré de résistance au feu des éléments de sectorisation doit être précisé par le concepteur, en tenant compte des évolutions des connaissances ;
- les effets de pression dus à un incendie doivent être évalués ; si nécessaire, une qualification adéquate doit être menée pour la fermeture des ouvertures qui doivent résister au feu, en particulier pour celles situées à la frontière d'un secteur de feu ;
- le suivi de la propagation des incendies doit être considéré comme un but dans la conception des systèmes de détection d'incendie ;
- les contre-mesures nécessaires en cas d'incendie pour protéger les systèmes classés de sûreté (éléments de sectorisation, détection d'incendie et systèmes de lutte contre l'incendie) doivent être dimensionnés pour résister à un séisme.

F.1.2.4 - Explosions internes

La priorité doit être donnée à la prévention des explosions internes, notamment par la limitation stricte de l'utilisation de gaz et fluides explosifs. Les moyens correspondants de même que les relations entre explosions internes et les autres agressions doivent être définis par le concepteur.

F.1.2.5 - Projectiles internes

Des projectiles internes peuvent provenir de la défaillance d'équipements tournants ou de la défaillance de composants à haute énergie. Ces défaillances doivent être évitées autant qu'il est

possible par des exigences de qualité et de surveillance ; les mesures correspondantes doivent être définies par le concepteur, notamment la mise en place de dispositifs pour empêcher la mise en survitesses d'équipements tournants.

Néanmoins, des études doivent être réalisées pour évaluer les conséquences possibles de projectiles d'origine interne représentatifs, notamment un projectile provenant d'un corps à basse pression de la turbine ; en fonction des résultats de ces études, des dispositions supplémentaires doivent être mises en oeuvre autant qu'il est nécessaire.

F.1.2.6 - Chutes de charge

En principe, les chutes de charge sur des équipements liés à la sûreté doivent faire l'objet de dispositions de prévention en fonction de l'importance des conséquences qui en résulteraient. Les niveaux de défense contre les chutes de charges (dispositions de prévention, de surveillance et de limitation des conséquences à mettre en oeuvre) doivent être définis par le concepteur.

F.2 - Protection contre les agressions externes

F.2.1 - Évènements à considérer

Les agressions externes à considérer dans la démonstration de sûreté et pour lesquelles des dispositions de conception sont demandées dans la section **A.2.5** incluent :

- les tremblements de terre,
- les chutes d'avions,
- les explosions externes,
- la foudre et les interférences électromagnétiques,
- les eaux souterraines,
- les conditions météorologiques extrêmes (température, neige, vent, pluie, ...),
- les inondations externes,
- la sécheresse,
- la formation de glace,
- les gaz toxiques, corrosifs ou inflammables..

En règle générale, un bon moyen pour déterminer les dispositions à mettre en place contre les agressions externes est de définir des cas de charge. Une méthode appropriée doit être définie pour chaque agression externe en vue de déterminer les chargements ainsi que les structures, systèmes et équipements qui doivent résister à ces chargements ; de plus, pour certaines agressions externes, cette approche doit être complétée par une approche événementielle incluant, si nécessaire, une analyse fonctionnelle pour évaluer les dépendances entre agressions externes et agressions ou événements internes.

F.2.2 - Exigences pour la conception des dispositions de protection contre des agressions externes spécifiques

F.2.2.1 - Séismes

Il existe deux possibilités pour la conception sismique d'une tranche : dimensionner avec des spectres et des valeurs d'accélération spécifiques au site ou dimensionner en utilisant des spectres standardisés. Dans le dernier cas, une intensité de VIII dans l'échelle MSK pourrait être retenue, par exemple pour la conception des bâtiments et des équipements non spécifiques au site ; ceci implique que, pour certains sites, des adaptations pourraient être nécessaires au cas par cas.

Dans le contexte sismotectonique européen, les trois spectres présentés sur la figure **F.1** apparaissent bien adaptés et suffisamment conservatifs pour un dimensionnement standard. Avant toute décision sur la construction d'une tranche sur un site spécifique, le concepteur doit prouver que cette protection standard est adéquate au vu des caractéristiques réelles du site.

Les bâtiments classés de sûreté doivent être dimensionnés à l'égard des séismes, en utilisant des critères appropriés selon les exigences fonctionnelles correspondantes. De plus, les fonctions de sûreté doivent être accomplies pour le séisme de dimensionnement en supposant des endommagements aux équipements non sismiques ; ceci implique une vérification détaillée du comportement des installations, en tenant compte de façon appropriée de la disposition précise des équipements.

Un "séisme d'inspection" avec une accélération horizontale maximale de 0,05 g en champ libre est adéquat ; après l'occurrence d'un séisme de niveau inférieur ou égal à celui-ci, aucune vérification ou inspection des composants importants pour la sûreté ne devrait être nécessaire avant de ramener ou de maintenir la tranche en fonctionnement normal. Cependant des dispositions adéquates doivent être mises en place au stade de la conception pour permettre les inspections et les tests qui pourraient s'avérer nécessaires en cas de dépassement de ce niveau d'accélération.

Pour le dimensionnement des composants et des structures des tranches électronucléaires de la prochaine génération, la combinaison du séisme de dimensionnement avec l'accident de perte de réfrigérant primaire de référence doit être prise en compte. Pour le dimensionnement des structures internes de la cuve du réacteur, cette exigence pourrait être traitée en considérant un cas de charge combinant le séisme de dimensionnement et la rupture de la plus grosse tuyauterie connectée à une tuyauterie primaire principale. De plus, concernant le dimensionnement et l'étanchéité de l'enceinte de confinement, le concepteur doit préciser sa position sur la combinaison d'une défaillance d'une tuyauterie de vapeur avec le séisme de dimensionnement. Les systèmes nécessaires pour faire face aux transitoires, incidents et accidents de référence doivent être conçus ou qualifiés pour la combinaison des chargements résultant des transitoires, incidents et accidents de référence correspondants et du séisme de dimensionnement.

Une approche événementielle doit être appliquée pour identifier de manière exhaustive les équipements dont la défaillance pourrait induire la défaillance d'équipements dimensionnés au séisme nécessaires pour l'accomplissement des fonctions de sûreté ; cette approche doit être complétée pendant la phase de construction par une visite des locaux. Des mesures de conception

complémentaires doivent être mises en place autant qu'il est possible pour supprimer les difficultés identifiées. De plus, des défaillances simultanées d'équipements non dimensionnés au séisme doivent être considérées selon une méthode appropriée.

Le concepteur doit aussi préciser comment il a l'intention de prouver l'existence de marges de dimensionnement suffisantes en cohérence avec les objectifs généraux de sûreté indiqués dans la section **A.1.1**. L'évaluation des marges doit être réalisée dans le but de démontrer qu'il n'y aurait pas d'effet falaise en matière de conséquences radiologiques en supposant des valeurs d'accélération inférieures aux valeurs d'accélération spécifiques au site ; la méthode correspondante doit tenir compte du comportement réel d'équipements représentatifs et des possibilités de défaillances simultanées d'équipements.

Pour faire face à la possibilité d'une perte de longue durée des sources électriques externes, toutes les sources électriques de secours doivent être dimensionnées et qualifiées au séisme.

F.2.2.2 - Chutes d'avions

Pour ce qui concerne les chutes d'avion, des dispositions doivent être prises pour assurer une protection appropriée des bâtiments liés à la sûreté en considérant de façon appropriée les trafics de l'aviation générale et de l'aviation militaire à proximité du site et en anticipant autant que possible leurs évolutions au cours de la vie de l'installation.

La protection des systèmes de sûreté doit être considérée à l'égard de l'impact direct (pénétration) ainsi qu'à l'égard de l'impact indirect liés aux vibrations induites.

Ces objectifs peuvent être traités en dimensionnant le bâtiment du réacteur, le bâtiment du combustible usé et certains bâtiments auxiliaires (de manière à assurer sans redondance la protection des équipements nécessaires pour arrêter le réacteur et empêcher la fusion du cœur)²⁴ avec les diagrammes de chargement en fonction du temps C1 et C2 présentés sur la figure **F.2**, appliqués à une aire circulaire de 7 m² de la manière suivante :

1. Le diagramme de chargement en fonction du temps C1 doit être utilisé pour le dimensionnement des structures internes de ces bâtiments contre les vibrations induites, en supposant un comportement linéaire élastique du matériau et un impact au centre de chaque voile de protection externe. Pour éviter des excitations extrêmes, un découplage des structures internes des parois externes doit être utilisé. Autant que possible, la fixation de systèmes et de composants sur les voiles externes devrait être évitée. Les spectres de réponse correspondants à considérer pour la conception des équipements ne doivent être calculés que pour les éléments structuraux principaux de ces bâtiments.

²⁴ Ce paragraphe implique que certains bâtiments auxiliaires peuvent être dimensionnés sans protection à l'égard des chutes d'avion pourvu que les équipements à l'intérieur des bâtiments protégés soient suffisants pour l'arrêt du réacteur et la prévention de la fusion du cœur sans redondance.

2. Concernant la protection contre la pénétration, le diagramme de chargement en fonction du temps C1 doit être utilisé pour le dimensionnement des parois externes des mêmes bâtiments contre les chargements résultant d'un impact direct, de manière à assurer qu'il n'y aura ni pénétration ni écaillage et que les déformations (armatures, béton) seraient limitées.
3. En outre, le diagramme de chargement en fonction du temps C2 doit être utilisé pour le dimensionnement à l'état limite ultime (selon l'Eurocode 2, partie 1)²⁵:
 - a) du bâtiment du réacteur de manière à assurer que la perforation est évitée et que l'écaillage qui pourrait survenir ne compromettrait pas l'arrêt du réacteur et la prévention de la fusion du cœur,
 - b) du bâtiment du combustible usé de manière à assurer l'absence de découverture du combustible usé.

L'analyse dynamique des vibrations induites peut être réalisée en utilisant une technique de superposition d'analyse modale avec la combinaison des réponses modales selon la méthode de « la racine carrée de la somme des carrés ».

Il est souligné que, avec une disposition appropriée assurant une séparation géographique des équipements redondants non protégés, il n'est pas nécessaire de compléter l'approche par cas de charge correspondante par une approche événementielle. Cependant, il est souligné, en relation avec le fait que les tuyauteries de vapeur sont implantées par paires et ne sont pas protégées contre les chutes d'avions, que la vidange simultanée de deux générateurs de vapeur devrait être étudiée avec des règles appropriées.

F.2.2.3 - Explosions

Concernant les explosions externes, il est nécessaire de prendre en compte, pour le dimensionnement des tranches électronucléaires de la prochaine génération, comme chargement standard en fonction du temps une onde de pression de forme triangulaire à front raide avec une surpression maximale de 100 mbar et une durée de 300ms. C'est-à-dire que, en tenant compte des réflexions possibles sur les parois et les toits des bâtiments, le chargement en fonction du temps sur les parois des bâtiments consistera en une onde de surpression maximale de 200 mbar sur les parois planes.

Pour une protection adéquate des tranches électronucléaires de la prochaine génération, le bâtiment du réacteur, le bâtiment du combustible usé, les bâtiments de sauvegarde et les bâtiments des diesels doivent être protégés de même que les structures et les conduits spécifiques au site liés à l'alimentation en eau brute. De plus, la protection du bâtiment des auxiliaires nucléaires doit être considérée pour ce qui concerne le risque de rejets radioactifs.

²⁵ La définition de l'état ultime limite dans l'Eurocode 2, partie 1, est « associée à l'effondrement ou aux autres formes de défaillance de structure qui peuvent mettre en danger la sécurité des personnes ». Ainsi la démonstration relative à ce paragraphe peut tenir compte des murs de protection autres que les parois externes du bâtiment du réacteur et du bâtiment du combustible usé.

Avant qu'une décision soit prise sur la construction d'une tranche sur un site spécifique, le concepteur doit prouver que la protection standard relative aux explosions est appropriée en tenant compte du développement industriel actuel et planifié autour du site. Dans le cas contraire des mesures administratives doivent être prises ou des protections complémentaires doivent être mises en place.

Figure F.1 - SPECTRES DE SEISMES

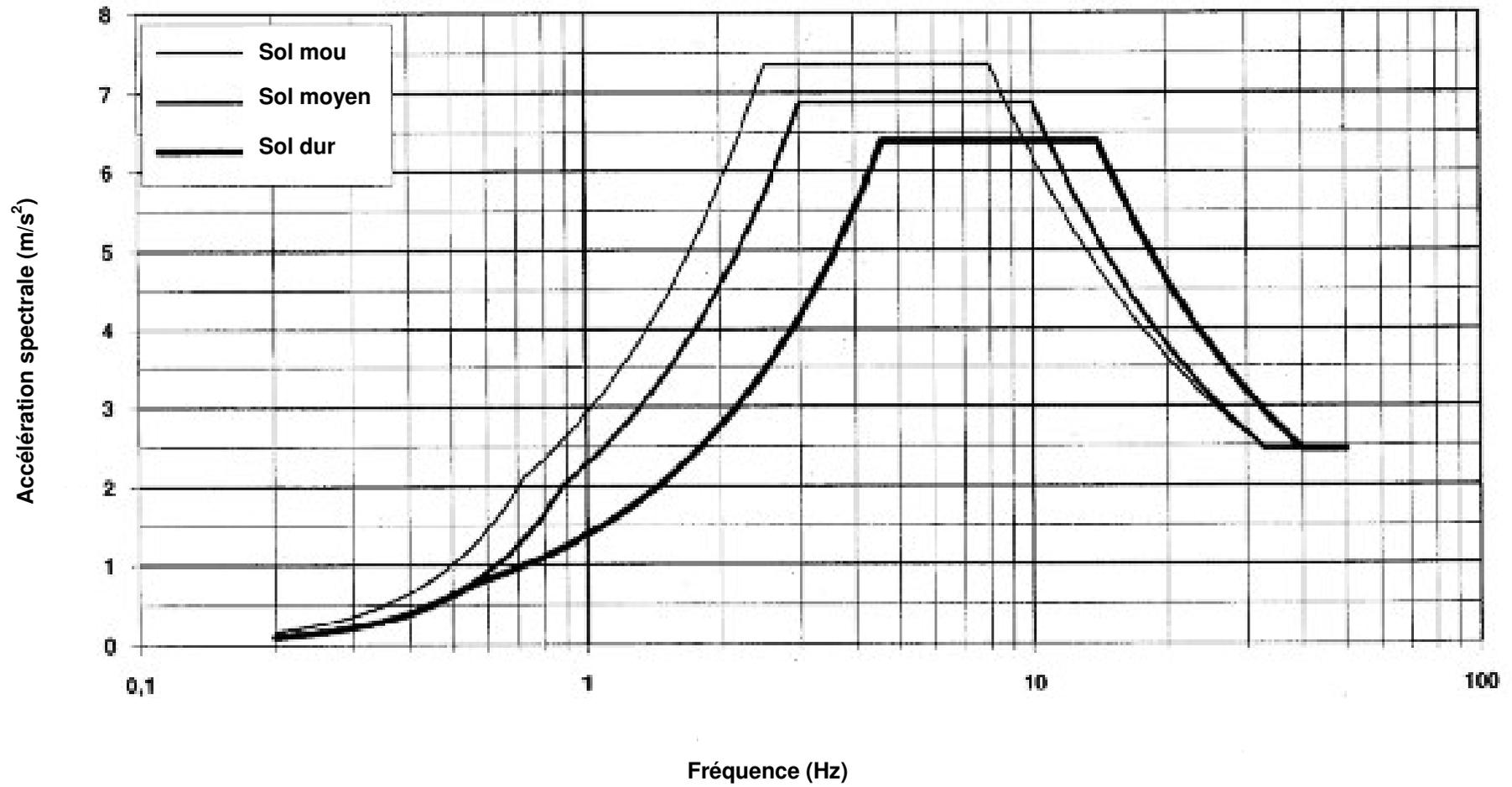
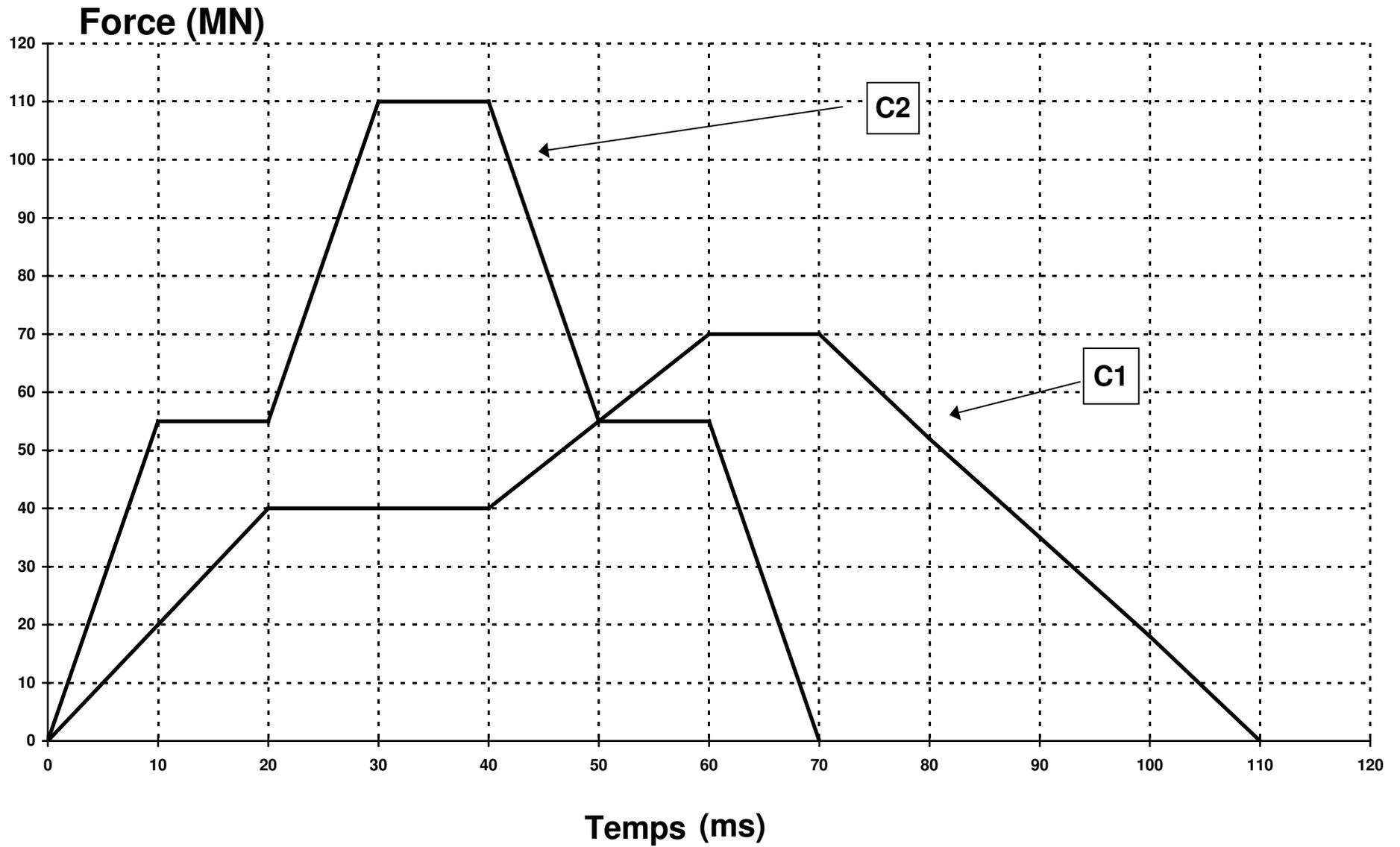


Figure F.2 – DIAGRAMMES DE CHARGEMENT EN FONCTION DU TEMPS



G - EXIGENCES DE CONCEPTION DES SYSTEMES ET EFFICACITE DES FONCTIONS DE SURETE

G.1- Conception du système de refroidissement de la piscine du combustible usé

Le système de refroidissement de la piscine du combustible usé pourrait consister en deux trains identiques indépendants, chaque train ayant deux pompes et un échangeur de chaleur refroidi par le système de refroidissement intermédiaire.

Les exigences suivantes seraient appliqués au système de refroidissement de la piscine du combustible usé :

- la conception de la piscine du combustible usé et la disposition des piquages d'aspiration et de sortie du système de refroidissement de la piscine seraient telles qu'elles éviteraient une recirculation directe entre le refoulement et l'aspiration du système de refroidissement ;
- la température de la piscine serait maintenue inférieure à 50°C en fonctionnement normal (états en puissance et à l'arrêt jusqu'au commencement du déchargement du cœur dans l'état E) avec une pompe d'un train en fonctionnement ;
- la température de la piscine serait maintenue inférieure à 50°C pendant les états d'arrêt E et F avec deux trains en fonctionnement et une pompe de chaque train en fonctionnement ;
- le système et la piscine du combustible usé devraient pouvoir supporter une température de 100°C. Le redémarrage et le fonctionnement du système doivent être possibles avec une piscine du combustible usé à 100°C.

Une telle conception permet de conserver la disponibilité d'une pompe après la perte d'un train en postulant une défaillance unique active sur l'autre train, en reconnaissant que "l'exclusion" de la défaillance unique passive sur cet autre train pourrait être tolérée si des exigences rigoureuses sont appliquées au stade de la conception et de la construction de même que pour l'inspection en service du système de refroidissement de la piscine du combustible usé et des barillets du système de refroidissement intermédiaire.

Cependant, l'approche relative aux événements initiateurs pour le système de refroidissement de la piscine du combustible usé et les systèmes supports associés, doit être définie par le concepteur, avec le classement de ces événements dans les catégories de conditions de fonctionnement et les conditions de fonctionnement de réduction du risque de la tranche et les règles d'analyse associées. Les exigences de conception du système de refroidissement de la piscine du combustible usé doivent refléter l'importance de la fonction d'évacuation de la puissance résiduelle. Pour les transitoires, incidents et accidents de référence, des exigences plus rigoureuses devraient être appliquées aux conditions de fonctionnement les plus fréquentes. En particulier, des limitations adéquates de la température de la piscine du combustible usé doivent être définies pour les transitoires de référence en supposant la défaillance d'un train du système, même pendant la maintenance préventive²⁶ et les

²⁶ Le temps nécessaire pour rétablir la fonction en cas de maintenance peut être pris en compte.

essais périodiques ; ces limitations doivent tenir compte des exigences appliquées à la peau d'étanchéité de la piscine de même qu'aux structures en béton et être cohérentes avec la protection des autres systèmes de sûreté.

Il est aussi souligné que le concepteur doit prévoir des dispositions permettant la maîtrise de la perte totale du système de refroidissement de la piscine du combustible usé tout en maintenant la fonction de confinement ; dans le cas contraire, la vraisemblance d'une ébullition de l'eau dans la piscine de combustible usé devra être réduite par des améliorations adéquates, notamment des systèmes supports du système de refroidissement de la piscine. De plus, comme indiqué au paragraphe **E.2.2.6**, la fusion du combustible dans la piscine doit être "pratiquement éliminée" ; le concepteur doit fournir les justifications de cette "élimination pratique", incluant les résultats d'études probabilistes de sûreté.

G.2 - Efficacité de l'étanchéité de l'enceinte de confinement

Comme indiqué au paragraphe **B.1.4.1**, un faible taux de fuite de la paroi interne de l'enceinte de confinement est essentiel.

Une attention appropriée doit être portée aux points suivants :

- le béton à hautes performances doit être spécifié en détail ; des critères d'acceptation et des tests adéquats concernant les paramètres tels que la porosité, la perméabilité, la maniabilité, le retrait et le fluage doivent être définis indépendamment du choix d'un site. Après le choix de celui-ci, ces tests devront être mis en œuvre ;
- en plus des investigations menées par calcul dans une première étape, la validité des tolérances de construction et des procédés de construction pour l'utilisation combinée d'un béton à hautes performances et de tendons 55T15 doit être vérifiée expérimentalement au moins par des tests de laboratoire avec la composition spécifique du béton ;
- le processus de qualification du matériau de la peau d'étanchéité et des produits d'injection doit être spécifié ; le choix de ces composants sera fondé sur les résultats des essais correspondants ;
- la paroi interne du bâtiment de confinement devra être équipée d'une instrumentation adéquate pour suivre avec précision la perte de la précontrainte au cours du temps dans les zones singulières ; des dispositions doivent être prises pour pouvoir remplacer ou compléter les dispositifs correspondants, si nécessaire.

Des informations doivent également être fournies par le concepteur concernant les dispositions mises en place pour éviter les fuites non collectées de l'enceinte de confinement pendant toute la vie de l'installation. En tout état de cause, la validité devra en être prouvée par des essais appropriés.

Des informations détaillées doivent aussi être fournies par le concepteur sur les sujets suivants concernant la conception du système de ventilation de l'espace entre enceintes :

- les hypothèses relatives à la condensation de vapeur dans le béton de la paroi interne de l'enceinte de confinement doivent être définies après une évaluation appropriée des résultats

expérimentaux²⁷ disponibles ; le système de ventilation de l'espace entre enceintes doit être dimensionné en conséquence ;

- la durée pendant laquelle l'espace entre enceintes serait maintenu en dépression après l'arrêt du système de ventilation de cet espace doit être précisée et justifiée ;
- la conception du système de ventilation de l'espace entre enceintes doit aussi tenir compte de façon appropriée des fuites ou ruptures possibles de composants implantés sur la paroi externe du bâtiment de confinement ;
- l'absence de secours électrique des ventilateurs du système de ventilation de l'espace entre enceintes par les petits groupes électrogènes doit être justifiée ;
- l'intérêt d'une mesure permanente et enregistrée de l'iode et des aérosols dans les tuyauteries de la ventilation de l'espace entre enceintes en aval des filtres doit être examiné ;
- une information détaillée doit aussi être fournie sur les moyens de confinement associés aux locaux du système de ventilation de l'espace entre enceintes, avec le classement des équipements correspondants.

G.3 - Conception du contrôle-commande

1. Les exigences applicables au contrôle-commande classé de sûreté doivent être décrites par le concepteur dans une spécification ; la cohérence de ces exigences avec la démonstration de sûreté relative aux transitoires, incidents et accidents de référence de même qu'aux conditions de fonctionnement avec défaillances multiples doit être justifiée.

2. Les fonctions de contrôle-commande peuvent être classées F1A, F1B or F2 selon la classification générale des fonctions de sûreté (voir la section **B.2.1**). L'efficacité des actions automatiques dans ces classes doit garantir les périodes de grâce définies pour les contre-mesures manuelles en cas d'incident.

3. Pour accomplir ces fonctions, l'architecture des systèmes de contrôle-commande pourrait être mise en place comme suit :

- a) interfaces avec le procédé (instrumentation, organes de coupure et actionneurs) ;
- b) automates (surveillance et conduite de la tranche dans toutes les conditions normales, maîtrise du cœur, fonctions de limitation, fonctions de protection, fonctions de support et fonctions post-accidentelles, commande des actionneurs et hiérarchisation des commandes des fonctions classées) ;
- c) suivi et conduite de la tranche avec les interfaces homme-machine.

4. La structure physique des systèmes et équipements de contrôle-commande doit être conçue de telle sorte qu'une indépendance adéquate puisse être démontrée entre les fonctions de différents niveaux de la défense en profondeur. Ceci s'applique notamment aux limites entre systèmes de différentes classes de sûreté. De même, l'indépendance doit être démontrée pour les équipements redondants mis en place pour répondre au critère de défaillance unique ainsi qu'à des exigences de maintenance et de séparation (pour la protection contre les agressions internes) ; les fonctions F1 devraient être capables de répondre au critère de défaillance unique pendant la maintenance ou les essais périodiques. L'indépendance doit être justifiée par des dispositions telles que la ségrégation,

²⁷ Y compris les résultats de l'installation MAEVA.

l'isolement, l'autonomie, la diversification ; en particulier, des dispositions (comprenant une diversification logicielle et matérielle) doivent être mises en place pour limiter les défaillances de cause commune logicielles, comme indiqué dans la section **A.2.2**.

5. En principe, la démonstration de sûreté devrait être faite en considérant les moyens utilisés normalement par les opérateurs dans la salle de commande principale. Cependant, la mise en place dans la salle de commande principale d'une interface homme-machine conventionnelle classée F1B pour pouvoir réaliser la démonstration de sûreté avec des équipements classés F1 alors que les opérateurs utiliseraient une interface homme-machine informatisée classée F2, pourrait être acceptée pour autant que :

- a) le matériel et l'architecture de l'interface homme-machine informatisée satisfassent aux exigences applicables aux systèmes F1B,
- b) le logiciel correspondant satisfasse à des exigences de qualification détaillées à proposer par le concepteur,
- c) les moyens mis en oeuvre pour la détection et la signalisation des défaillances de fonctions et d'équipements F2 essentiels de l'interface homme-machine informatisée satisfassent aux exigences applicables aux fonctions et équipements F1B.

6. En plus de la salle de commande principale, une station de repli doit être mise en place pour le cas d'indisponibilité de la salle de commande principale. Le concepteur doit préciser les situations pour lesquelles la salle de commande principale serait indisponible, les conséquences de telles situations et les tâches à accomplir en conséquence depuis la station de repli et les moyens associés.

7. Les défaillances du de contrôle-commande doivent être considérées de façon systématique pour la conception et la démonstration de sûreté des tranches électronucléaires de la prochaine génération. En particulier, le concepteur doit considérer toutes les possibilités raisonnables de génération d'événements initiateurs résultant d'actions inappropriées des systèmes de contrôle-commande et vérifier si ces événements initiateurs sont enveloppés par l'analyse des transitoires, incidents et accidents de référence et des conditions de fonctionnement avec défaillances multiples.

D'un autre côté, de telles actions inappropriées des systèmes de contrôle-commande doivent aussi être considérées en tant qu'aggravants uniques dans l'analyse des transitoires, incidents et accidents de référence. Ne sont à considérer que les actions intempestives (uniques ou multiples) qui peuvent résulter d'une défaillance unique dans les sous-systèmes de contrôle-commande ou les systèmes supports.

En tout état de cause, des techniques adéquates doivent être mises en oeuvre lors de la conception des matériels, des logiciels et des applications fonctionnelles pour réduire les possibilités d'actions inappropriées. Une attention spécifique devrait être portée au stade de la conception aux actions de commande simultanées sensibles aux erreurs de conception ou aux erreurs des opérateurs.

8. Comme indiqué dans les parties **A.1**, **F.1** et **F.2**, la démonstration de sûreté des tranches électronucléaires de puissance de la prochaine génération doit traiter les agressions internes et externes. Ceci inclut les conséquences de telles agressions sur les systèmes de contrôle-commande. Les possibilités d'agressions ayant leur origine dans les équipements de contrôle-commande doivent aussi être considérées.

G.4 – Utilisation de codes techniques

Comme indiqué dans la section **A.1.2**, la qualité de la conception, de la fabrication, de la construction et de l'exploitation est essentielle pour la sûreté dans le cadre du premier niveau de la "défense en profondeur". La qualité doit être obtenue et démontrée notamment par un ensemble adéquat d'exigences de conception, de fabrication, de construction et d'exploitation de même que par l'assurance de la qualité. Ces exigences peuvent être regroupées dans des codes techniques.

Concernant les équipements de contrôle-commande pour les tranches électronucléaires de puissance de la prochaine génération, les points suivants sont soulignés :

- les composants de type boîte noire (matériels et logiciels) doivent disposer d'une spécification validée fondée sur des tests spécifiques et si possible sur un retour d'expérience pertinent ;
- en principe, pour les systèmes de contrôle-commande réalisant des fonctions F1A, il faut éviter les parties de logiciel non utilisées (c'est-à-dire les codes morts) ; les exceptions doivent être justifiées. Tout code mort devra être identifié. Les codes morts devront être spécifiés, codés, vérifiés et validés avec le reste des codes des systèmes concernés.

Concernant le génie civil des tranches électronucléaires de la prochaine génération :

- la cohérence des règles applicables doit être démontrée, en tenant compte des ajouts et des modifications par rapport à des codes techniques existants ;
- un critère de compression résiduelle moyenne dans la partie courante de la paroi interne de l'enceinte de confinement n'est pas suffisant pour garantir une étanchéité adéquate de cette paroi interne, y compris les zones singulières, dans les conditions accidentelles ; des critères additionnels tel qu'une limitation appropriée des largeurs de fissures devrait être considéré ;
- des dispositions doivent être mises en place pour assurer l'étanchéité de la paroi interne du bâtiment de confinement et de ses traversées pour une rupture de la tuyauterie d'expansion du pressuriseur combinée avec le séisme de dimensionnement ; pour autant qu'ils soient justifiés, les critères correspondants pourraient être moins sévères que ceux appliqués pour l'étanchéité dans les conditions d'un accident grave ;
- les dispositions prises pour satisfaire aux objectifs de conception en matière de durée de vie doivent être précisées et justifiées en tenant compte des incertitudes relatives aux paramètres qui affectent le vieillissement de l'enceinte de confinement ;
- des règles adéquates doivent être définies pour satisfaire les exigences fonctionnelles relatives, d'une part aux autres bâtiments que le bâtiment du réacteur, d'autre part aux structures métalliques (traversées du bâtiment du réacteur, peau d'étanchéité de la piscine du combustible usé...).

Concernant les systèmes de chauffage, de ventilation et de conditionnement d'air des tranches électronucléaires de la prochaine génération :

- la conception des dispositifs de confinement statique et dynamique des bâtiments périphériques, y compris le bâtiment des auxiliaires nucléaires, doit être cohérente avec l'accomplissement des objectifs de sûreté indiqués dans la section **A.1.1**; pour les accidents graves, des études de

sensibilité concernant la disponibilité des systèmes de ventilation et les taux de fuite de ces bâtiments doivent être présentées ;

- la liste précise des locaux à risque iode, y compris les locaux où circulent des liquides radioactifs dans des situations accidentelles, doit être précisée par le concepteur, de même que des critères adéquats pour la fonction de confinement de ces locaux dans les différentes situations accidentelles, en tenant compte des effets de dépression du au vent sur ces bâtiments ;
- une méthode doit être présentée concernant la définition des conditions atmosphériques de base et extrêmes (température, humidité, durée, ...) de même que les exigences à appliquer, notamment aux systèmes de ventilation pour faire face à ces conditions ;
- les dispositions de conception prises pour assurer l'habitabilité de la salle de commande principale doivent être détaillées.