

Conception des réacteurs à eau sous pression

OBJECTIFS ET PRINCIPES GENERAUX DE SÛRETE POUR LA CONCEPTION

L'article L. 1333-2 du code de la santé publique stipule qu'un des objectifs de conception des installations est de minimiser autant que possible l'exposition radiologique des personnes et des impacts sur l'environnement, à la fois à l'intérieur et à l'extérieur de l'installation, dans des conditions économiquement acceptables.

Conformément au I de l'article 4.1.1 et au II de l'article 6.1 de l'arrêté du 7 février 2012, un objectif de conception consiste à limiter :

- les quantités et la toxicité chimique et radiologique des rejets d'effluents liquides et gazeux ;
- les quantités et les activités des déchets radioactifs ;
- dans le cadre du fonctionnement normal de l'installation, en utilisant les meilleures techniques disponibles selon l'annexe 1 de l'arrêté du 26 avril 2011, tout en tenant compte des caractéristiques de l'installation, de son emplacement géographique et des conditions environnementales locales. Cet objectif vise à optimiser la production d'effluents et de déchets tout en garantissant la radioprotection.

De même, la conception vise à contribuer, pour le fonctionnement normal, à atteindre les objectifs d'optimisation de l'exposition des travailleurs aux rayonnements ionisants, tels que mentionnés à l'article R. 4451-10 du code du travail.

Incidents et accidents susceptibles de survenir

En accord avec les dispositions de l'article 8 bis introduit par la directive européenne du 8 juillet 2014, les objectifs de conception suivants sont à prendre en considération :

1. Limiter les rejets de substances radioactives ou dangereuses, ainsi que leurs impacts sur l'homme et l'environnement, en cas d'incidents ou d'accidents, à des niveaux aussi bas que possible dans des conditions économiquement acceptables, en tenant compte des avancées techniques et pratiques au moment de la conception. Cela implique une recherche constante d'amélioration de la sûreté nucléaire, en intégrant les retours d'expérience des installations antérieures.
2. Prévenir les incidents et accidents de nature radiologique et limiter les conséquences de ceux qui pourraient survenir malgré les mesures préventives. Cela inclut la minimisation du nombre d'incidents, la réduction de la fréquence des accidents conduisant à une fusion de combustible, et la prévention ou limitation des rejets radioactifs résultant des incidents ou accidents, notamment ceux avec fusion de combustible.
3. Pour les risques radiologiques spécifiquement, les objectifs incluent la minimisation des conséquences des accidents sans fusion de combustible, le maintien de la fréquence estimée de fusion de combustible à un niveau très bas, et la prévention ou l'atténuation des conséquences des accidents avec fusion de combustible pour éviter la nécessité de mesures de protection des populations.
4. La conception doit également contribuer au respect des objectifs d'optimisation de l'exposition des travailleurs aux rayonnements ionisants, comme spécifié dans le code du travail.

Ces objectifs visent à garantir un niveau élevé de sûreté nucléaire et de protection de l'environnement tout au long du cycle de vie des installations.

Défense en profondeur

Le principe de défense en profondeur, conforme à l'arrêté du 7 février 2012, vise à prévenir les incidents et accidents nucléaires et à limiter leurs conséquences. Il se décline en quatre niveaux de défense successifs :

1. Prévention des incidents.
2. Détection et intervention pour éviter l'accident ou ramener le réacteur à un état sûr.
3. Maîtrise des accidents pour limiter leur aggravation et maintenir la sécurité.
4. Gestion des situations d'accident avec fusion de combustible pour en limiter les conséquences.

Un cinquième niveau de défense concerne la gestion de crise par les autorités publiques pour atténuer les conséquences radiologiques des rejets radioactifs en cas d'accident majeur. Ces niveaux de défense doivent être suffisamment indépendants pour garantir le respect des objectifs de sûreté spécifiés.

Barrières

En matière de risque radiologique, l'installation doit respecter les exigences réglementaires en mettant en place des barrières physiques entre les substances radioactives et les personnes ainsi que l'environnement. Ces barrières comprennent les gaines du combustible, l'enveloppe du circuit primaire et l'enceinte de confinement. Elles doivent être conçues de manière indépendante et avec des marges de sécurité pour prévenir leur défaillance en fonctionnement normal ou en cas d'incidents ou d'accidents. Ces mesures garantissent que les fonctions de sécurité essentielles sont assurées, conformément aux réglementations en vigueur.

Fonctions permettant la prévention des incidents ou accidents ou la limitation de leurs conséquences

Selon les réglementations de l'arrêté du 7 février 2012, les fonctions nécessaires à la démonstration de la sûreté nucléaire, notamment en ce qui concerne les risques radiologiques, sont identifiées. Ces fonctions comprennent les fonctions de sûreté et les fonctions de support. Des dispositions de conception doivent être prises pour garantir le bon fonctionnement de ces fonctions, assurant ainsi un niveau élevé de fiabilité même en cas d'incidents ou d'accidents, conformément aux normes réglementaires.

DEMONSTRATION DE SÛRETE NUCLEAIRE

Pour garantir la sûreté nucléaire d'une installation, il est crucial d'identifier tous les scénarios potentiels qui pourraient compromettre sa sécurité. Ces scénarios incluent les événements déclencheurs uniques, tels que les incidents initiés par des défaillances matérielles ou des erreurs humaines, ainsi que les agressions internes et externes, comme les accidents naturels ou les incidents liés à l'environnement de l'installation.

Certains événements peuvent être exclus s'ils sont considérés comme physiquement impossibles ou extrêmement improbables, mais s'ils sont plausibles, ils doivent être traités avec des mesures spécifiques de prévention et d'atténuation pour réduire leurs conséquences potentielles.

En particulier, les accidents avec fusion du cœur doivent être évités autant que possible ou, à défaut, leur survenue doit être rendue extrêmement improbable. Cela nécessite la mise en œuvre de dispositions spécifiques, telles que des systèmes de sécurité renforcés ou des conceptions de réacteurs plus sûres.

Pour évaluer la sûreté dans son ensemble, des études probabilistes sont menées, permettant d'analyser les risques associés à différents scénarios et de conforter les choix de conception en fonction des objectifs de sûreté établis.

Domaine de Conception de Référence :

Le domaine de conception de référence vise à englober tous les scénarios potentiels dans lesquels une installation nucléaire peut se trouver. Cela inclut les événements indésirables, tels que les incidents et les accidents, ainsi que les agressions internes et externes, comme les séismes ou les attaques extérieures. L'objectif principal de ce domaine est de démontrer, de manière conservatrice, que les mesures de sécurité mises en place sont adéquates pour contrer les effets néfastes de ces événements.

Conditions de Fonctionnement de Référence :

Les conditions de fonctionnement de référence sont des états normaux et anormaux dans lesquels une installation nucléaire peut se trouver. Elles sont classées en quatre catégories en fonction de la fréquence estimée des événements indésirables :

- Fonctionnement normal
- Incidents
- Accidents de catégorie 3
- Accidents de catégorie 4

Pour chaque catégorie, des objectifs et des exigences spécifiques sont définis pour garantir la sûreté de l'installation.

Critères Techniques d'Acceptation :

Des critères techniques sont établis pour chaque catégorie de conditions de fonctionnement de référence. Ces critères définissent des limites acceptables pour les grandeurs physiques pertinentes, telles que la température du combustible ou la pression du circuit primaire. Ils sont conçus pour être d'autant plus stricts que la fréquence estimée des conditions de fonctionnement de référence est élevée.

Règles d'Étude des Conditions de Fonctionnement de Référence :

Des règles détaillent la manière dont les conditions de fonctionnement de référence doivent être étudiées. Cela inclut les conditions initiales à prendre en compte, les actions des opérateurs à envisager en cas d'événement, les défaillances à considérer comme aggravants, etc. L'objectif est d'assurer une approche exhaustive et enveloppante dans l'évaluation des conditions de fonctionnement de référence.

Ensemble, ces éléments constituent un cadre complet pour évaluer et gérer les risques dans une installation nucléaire, en mettant l'accent sur la sûreté et la prévention des accidents.

Les agressions internes

La démonstration de sûreté nucléaire prend en compte diverses agressions internes définies par l'arrêté du 7 février 2012. Celles-ci comprennent des événements tels que les émissions de projectiles, les défaillances d'équipements sous pression, les collisions, les explosions, les incendies, les émissions de substances dangereuses, les interférences électromagnétiques, les actes de malveillance, les inondations, ainsi que d'autres agressions internes identifiées par l'exploitant ou jugées nécessaires par l'Autorité de sûreté nucléaire.

Les cumuls plausibles d'agressions internes sont également pris en compte, tenant compte des éventuelles dépendances entre les événements déclencheurs. Les études des agressions internes suivent des règles adaptées à chaque type d'agression, prenant en compte les conditions initiales, les actions des opérateurs, les états sûrs visés, les équipements concernés, et les programmes de maintenance préventive.

Les conséquences radiologiques des agressions internes sont évaluées conformément aux dispositions réglementaires, contribuant à vérifier la suffisance des dispositions prises à la conception pour assurer la sûreté de l'installation nucléaire.

Les agressions externes

La conception des installations nucléaires prend en compte les agressions externes de référence, excluant les actes de malveillance. Pour chaque agression externe, des mesures sont prises pour garantir la disponibilité des équipements importants pour la sûreté malgré les effets directs et indirects de l'agression, évitant ainsi de compromettre la sûreté de l'installation.

Les dispositions prises doivent reposer principalement sur des dispositifs statiques, avec la possibilité d'alerte et de suivi en cas d'agression externe prévisible. Elles ne doivent pas compromettre la protection contre d'autres événements du domaine de conception de référence et ne devraient pas conduire à un accident.

Les agressions externes de référence incluent divers événements tels que les risques industriels, les explosions, les séismes, les conditions météorologiques extrêmes, les incendies, les inondations, les actes de malveillance, et d'autres agressions identifiées par l'exploitant ou jugées nécessaires par l'autorité de sûreté nucléaire.

Ces agressions externes doivent être caractérisées en tenant compte des données disponibles concernant le site de l'installation et son environnement, ainsi que des évolutions prévisibles pendant la période d'exploitation. Les études sur les agressions externes doivent être réalisées selon des règles adaptées, en prenant en compte les conditions initiales, les actions des opérateurs, les états sûrs visés et les équipements concernés.

Les conséquences radiologiques des agressions externes sont évaluées conformément aux dispositions réglementaires, contribuant à vérifier la suffisance des dispositions prises à la conception pour assurer la sûreté de l'installation nucléaire.

Domaine de conception étendu

Le domaine de conception étendu vise à garantir que les installations nucléaires sont capables de résister à des événements plus complexes ou plus graves que ceux initialement envisagés, tout en limitant les rejets radioactifs dans l'environnement. Il comprend des conditions spécifiques, telles que DEC-A et DEC-B, ainsi que des agressions externes naturelles plus sévères.

Les conditions DEC-A visent à empêcher la fusion du combustible lors d'accidents complexes, tandis que les conditions DEC-B sont associées à des situations où la fusion est envisagée malgré les mesures préventives. Les événements du domaine étendu sont déterminés par des considérations déterministes et probabilistes, renforcées par l'expertise.

Pendant une condition DEC-A, l'installation doit maintenir un état sûr avec une réactivité maîtrisée et une évacuation de la puissance résiduelle. Pour une condition DEC-B, la sous-criticité et l'évacuation de la puissance résiduelle doivent être assurées. Les critères d'acceptation et les méthodes d'étude sont adaptés pour être moins conservateurs.

Les conséquences radiologiques sont évaluées pour vérifier l'efficacité des dispositions de conception. Les agressions externes naturelles sont également prises en compte pour minimiser les risques. Les actes de malveillance sont considérés dans la conception, avec des mesures de prévention et de limitation des conséquences.

Utilisation des études probabilistes de sûreté

Les analyses probabilistes et les études probabilistes de sûreté (EPS) sont utilisées pour orienter ou confirmer les choix de conception des systèmes de sécurité dans les installations nucléaires. Elles évaluent notamment la fréquence de fusion de combustible et des rejets radioactifs, ainsi que la robustesse de l'installation face à divers événements.

Ces analyses servent à évaluer la probabilité de situations mentionnées, à identifier les scénarios les plus préoccupants, à confirmer la liste des scénarios pour les études des conditions DEC-A, et à évaluer l'efficacité des mesures prises pour limiter les conséquences des accidents avec fusion de combustible.

Les EPS doivent prendre en compte tous les événements déclencheurs pertinents, y compris ceux affectant simultanément le réacteur et la piscine d'entreposage des assemblages de combustible, ainsi que ceux pouvant affecter l'ensemble des installations d'un site sur une longue durée.

La méthodologie utilisée dans les EPS doit être appropriée, prenant en compte l'expérience internationale disponible et intégrant les dimensions techniques, organisationnelles et humaines. Les résultats des EPS doivent être présentés avec des analyses d'incertitude et de sensibilité, et les limites des EPS doivent être identifiées autant que possible.

La démonstration de sûreté nucléaire s'appuie sur des données à jour, des méthodes appropriées et des outils qualifiés, avec des critères de validation précis.

Principes pour le développement de méthodes d'études

Les méthodes d'études pour les événements accidentels sont explicitées et validées conformément à l'arrêté du 7 février 2012. Elles reposent sur des outils de calcul qualifiés et des choix de modélisation validés. Pour chaque scénario accidentel, les phénomènes physiques principaux sont identifiés, et les incertitudes sont prises en

compte de manière proportionnée aux enjeux. Des majorations sont appliquées pour tenir compte des phénomènes non modélisés, sans compromettre les conclusions des études. Une attention particulière est portée aux paramètres influençant les forces motrices passives, le cas échéant.

RECOMMANDATIONS GENERALES POUR LA CONCEPTION

Architecture des fonctions de sûreté

La conception des systèmes de sûreté du réacteur doit assurer une architecture adéquate pour répondre aux objectifs de sûreté. Les spécifications des systèmes doivent être précises, et l'application du principe de défense en profondeur implique la qualité de spécification, de conception, de réalisation et de contrôle de chaque composant, ainsi que l'indépendance, la redondance et la diversification des systèmes. L'utilisation de systèmes passifs peut être avantageuse dans certains cas.

Une indépendance suffisante entre les niveaux de défense en profondeur doit être assurée, notamment par une diversification, une séparation physique et une limitation adéquates des éléments importants. Les systèmes de sûreté doivent être indépendants les uns des autres, en particulier ceux utilisés dans des conditions différentes telles que DEC-A, DEC-B et les conditions de fonctionnement normal.

L'autonomie de l'installation est nécessaire pendant une durée compatible avec les interventions extérieures, visant généralement au moins 72 heures. L'utilisation de systèmes communs à plusieurs installations nucléaires doit être limitée et justifiée, notamment pour ne pas compromettre l'arrêt, le refroidissement et l'évacuation de la puissance résiduelle.

Conception des EIP

La catégorisation des fonctions de sûreté et la détermination des exigences des Éléments Importants pour la Protection (EIP) sont essentielles pour garantir un niveau de qualité approprié en matière de sûreté nucléaire. Cette démarche comprend plusieurs étapes :

1. Identification et catégorisation des fonctions de sûreté: Les fonctions de sûreté sont réparties en catégories en fonction de leur rôle et de leur importance pour la sûreté nucléaire, en tenant compte de la gravité de leurs défaillances, de leur fréquence d'utilisation et des délais disponibles pour les activer.
2. Classement des EIP: Les EIP sont classés en cohérence avec la catégorie de la fonction de sûreté qu'ils accomplissent, en se basant sur les exigences définies de conception, de fabrication et de suivi en exploitation.
3. Conception des systèmes IP: La conception des systèmes IP doit être basée sur les fonctions de sûreté auxquelles ils participent, en tenant compte de critères tels que la défaillance unique, le secours électrique et la séparation physique.
4. Fiabilité des EIP et des systèmes IP: Les EIP et les systèmes IP doivent être conçus pour assurer leur fiabilité, notamment en utilisant des dispositions de conception, de redondance et de diversification pour réduire les probabilités de défaillances de cause commune.
5. Qualification des EIP: Les EIP font l'objet d'une qualification pour garantir leur capacité à respecter leurs exigences définies, en tenant compte des conditions environnementales et des fluides impliqués.
6. Prise en compte des opérations de maintenance et de vieillissement: La conception des EIP doit permettre leur maintenance et leur suivi en exploitation, ainsi que la détection des mécanismes de vieillissement, afin de garantir leur intégrité et leurs performances.
7. Conception en vue du démantèlement: La conception doit prendre en compte les opérations de démantèlement et de remise en état du site, notamment en facilitant le démantèlement dans un délai aussi court que possible et en limitant l'exposition radiologique des travailleurs.
8. Choix techniques pour le démantèlement: Les choix techniques doivent favoriser les opérations de démantèlement, en tenant compte de la facilité d'inspection, d'assainissement et de démontage des équipements, ainsi que de la gestion des déchets produits.

Ces différentes étapes contribuent à assurer un haut niveau de sûreté nucléaire tout au long du cycle de vie de l'installation.

Prise en compte des dimensions organisationnelles et humaines dans la conception du système sociotechnique

Considérer les aspects organisationnels et humains lors de la conception d'un système sociotechnique sont primordiaux, en particulier dans le contexte des installations nucléaires. Il souligne que ce système repose sur une articulation entre des individus, une organisation, des moyens techniques et un environnement de travail. La démarche de conception doit être cohérente, intégrée et basée sur le retour d'expérience, ainsi que sur les normes et pratiques reconnues. La conception doit viser à réduire les actions humaines inappropriées et à favoriser la capacité du personnel à gérer les aléas. Cette recherche de dispositions de conception doit se faire de manière progressive et itérative, en tenant compte des besoins des utilisateurs, de l'organisation des activités et de l'environnement de travail. La validation des dispositions de conception doit se faire dans des conditions représentatives de l'exploitation réelle, en utilisant des méthodes d'évaluation appropriées. Enfin, la conception doit respecter les principes généraux de prévention en matière de santé et sécurité au travail, en évaluant les risques pour les intervenants.

Prise en compte de la radioprotection à la conception

La prise en compte des risques liés aux rayonnements ionisants dès la conception des installations est cruciale pour assurer la sécurité des travailleurs. Des mesures spécifiques doivent être prises pour réduire les expositions, notamment lors des périodes de maintenance ou de rechargement en combustible. Les avancées technologiques doivent être intégrées dans la conception pour limiter la formation de substances radioactives et réduire les activités humaines dans les zones réglementées. De plus, des dispositions de confinement et de surveillance appropriées doivent être définies pour éviter toute dispersion de substances radioactives. Les équipements de surveillance doivent être adaptés aux risques et permettre une mesure précise des conditions radiologiques. Enfin, des mesures facilitant la décontamination et le démantèlement des équipements doivent être prévues.

RECOMMANDATIONS SPECIFIQUES POUR LA CONCEPTION DES BARRIERES

Cœur du réacteur et dispositifs associés

La conception du cœur du réacteur et des dispositifs associés inclut la conception des assemblages de combustible, des dispositifs de contrôle des réactions nucléaires en chaîne, et des équipements internes de la cuve du réacteur. Les assemblages de combustible doivent être conçus avec des marges appropriées pour permettre l'insertion rapide d'éléments absorbants mobiles et assurer le refroidissement du combustible. Ils doivent également conserver leur intégrité lors des opérations d'entreposage, de transport et de manutention. Le cœur du réacteur doit résister aux charges statiques et dynamiques pour garantir un arrêt sûr, maintenir l'état sous-critique et permettre le refroidissement. Les équipements internes de la cuve doivent permettre le refroidissement du combustible et la maîtrise de la réaction nucléaire. En cas de séisme, le comportement du cœur et des équipements internes ne doit pas entraver l'arrêt du réacteur, son maintien sous-critique et le refroidissement du combustible. La surveillance du confinement des substances radioactives par les gaines des crayons de combustible doit être prévue dès la conception et maintenue tant que le combustible est présent dans l'installation.

Circuits primaire et secondaires

Des mesures doivent être prises pour assurer l'intégrité des équipements du circuit primaire principal (CPP) et des circuits secondaires principaux (CSP) tout au long du fonctionnement de l'installation. Ces mesures comprennent la qualité de la conception et de la fabrication, ainsi que la réalisation d'opérations d'entretien, de surveillance, d'inspections périodiques et de réparations pour maintenir leur niveau de sécurité. Elles visent à prévenir les modes de défaillance des équipements et à détecter tout endommagement éventuel.

Une protection contre les surpressions doit être mise en place pour le CPP et les CSP dans différents états du réacteur, y compris les conditions de DBC (Demande de Besoin de Courant) et les conditions DEC-A (Demande de Besoin de Courant en Absence d'Arrêt Automatique). Cette protection doit respecter les exigences réglementaires applicables en matière d'équipements sous pression. Dans certaines situations définies par la réglementation, les systèmes de régulation, de limitation et d'arrêt automatique du réacteur peuvent être considérés comme des dispositifs de sécurité pour démontrer le respect des exigences de protection contre les surpressions.

Composants «non ruptibles»

Une approche d'exclusion de rupture doit être appliquée aux gros composants du circuit primaire principal (CPP) et des circuits secondaires principaux (CSP), étant considérés comme "non ruptibles". Cette approche repose sur des mesures rigoureuses de conception, de fabrication et de surveillance en service pour prévenir la rupture de ces composants. Ces mesures comprennent l'analyse des modes de défaillance pertinents, le choix de matériaux résistants, la vérification des sollicitations subies, l'utilisation de procédés de fabrication de haute qualité et le suivi en service pour détecter toute dégradation éventuelle.

Dans cette perspective, diverses mesures sont nécessaires, telles que la détermination des sollicitations subies par les composants, l'analyse de leur comportement, la qualification des procédés de fabrication, la mise en place de techniques de contrôle appropriées, et la prise en compte de l'expérience passée. Ces éléments sont essentiels pour garantir l'intégrité des composants et la sûreté de l'installation.

Autres considérations liées au CPP

Dans le cadre du principe de défense en profondeur, les brèches sur les tuyauteries du circuit primaire sont considérées comme des événements initiateurs d'urgence (EIU) dans la démonstration de sûreté nucléaire. Des mesures doivent être prises pour limiter les conséquences de ces brèches, notamment en tenant compte des chargements résultant de ces événements pour le dimensionnement des composants principaux tels que les assemblages de combustible et les structures internes des composants primaires.

L'hypothèse d'exclusion de rupture peut être envisagée pour les tuyauteries primaires principales si des éléments démontrent que la rupture est extrêmement improbable avec un haut degré de confiance et que ce choix est raisonnable du point de vue de la sûreté globale de l'installation et de la radioprotection. Cependant, les ruptures jusqu'à la rupture doublement débattue des piquages connectés aux tuyauteries primaires principales doivent être prises en compte dans la démonstration de sûreté nucléaire.

La disposition des tuyauteries du circuit primaire doit être conçue de manière à éviter toute défaillance en cascade, et une instrumentation appropriée doit être prévue pour surveiller l'activité radiologique du fluide primaire et les fuites éventuelles du circuit primaire lorsque le réacteur est en fonctionnement.

Des dispositifs de protection contre les surpressions doivent être situés à l'intérieur de l'enceinte de confinement ou dans un local avec une ventilation adéquate pour prévenir les bipses du confinement. De plus, le fonctionnement du système de protection contre les surpressions ne doit pas entraîner de rejets de substances radioactives dans l'environnement, et des mesures de protection doivent être mises en place pour prévenir les risques de surpression à froid lors des états d'arrêt à froid.

Autres considérations liées aux CSP

Dans le cadre du principe de défense en profondeur, les brèches sur les tuyauteries des circuits secondaires principaux (CSP) doivent être considérées comme des événements initiateurs d'urgence (EIU) dans la démonstration de sûreté nucléaire. Des mesures doivent être prises pour limiter les conséquences de ces brèches, notamment en tenant compte des chargements résultant de ces événements pour le dimensionnement des structures internes des générateurs de vapeur ainsi que de l'enceinte de confinement et de ses structures internes.

Le recours à l'hypothèse d'exclusion de rupture pour les tuyauteries secondaires principales véhiculant de la vapeur nécessite des éléments démontrant que la rupture est extrêmement improbable avec un haut degré de

confiance, et que les effets hydrodynamiques significatifs sont évités. Cette hypothèse doit être justifiée en tenant compte des avantages et inconvénients pour la sûreté globale de l'installation et la radioprotection.

Si l'hypothèse d'exclusion de rupture est retenue, les masses et énergies libérées par la rupture doublement débattue de la tuyauterie principale de vapeur doivent être prises en compte pour la conception de l'enceinte de confinement et des systèmes associés.

Il est essentiel de réduire autant que possible les possibilités de défaillance de cause commune des tuyauteries principales de vapeur et des tuyauteries principales d'alimentation en eau des générateurs de vapeur. La disposition des tuyauteries des circuits secondaires principaux doit être conçue de manière à éviter toute défaillance en cascade, et une instrumentation doit être prévue pour surveiller en continu toute fuite du circuit primaire au niveau de chaque générateur de vapeur lors des phases de fonctionnement où l'évacuation de la chaleur du fluide primaire est assurée par les générateurs de vapeur.

3e barrière

Pour respecter les objectifs de sûreté, la troisième barrière, représentée par l'enceinte de confinement, doit être conçue pour limiter les rejets radioactifs lors des accidents. Des exigences mécaniques et d'étanchéité doivent être définies pour garantir l'efficacité de cette barrière, même en cas d'accident avec fusion du cœur. Il est crucial que cette enceinte puisse maintenir le confinement des substances radioactives sans nécessiter de système actif d'évacuation de la puissance résiduelle pendant plusieurs heures après un tel accident.

Des dispositifs tels que des igniteurs ou des recombineurs d'hydrogène doivent être installés pour limiter la concentration d'hydrogène dans l'enceinte en cas d'accident. De plus, des dispositions spécifiques doivent être prises pour prévenir ou limiter les effets de déflagrations d'hydrogène ou d'autres gaz combustibles, notamment lors de l'interaction du corium avec le béton.

Les traversées et ouvertures de l'enceinte de confinement doivent être minimisées autant que possible. Elles doivent déboucher dans des bâtiments périphériques présentant une capacité de confinement adéquate, sauf justification particulière. Des exigences strictes de qualification et d'étanchéité doivent être définies pour ces traversées, et des dispositifs d'obturation fiables doivent être prévus.

Les circuits qui pourraient véhiculer du fluide primaire lors d'incidents ou d'accidents doivent être équipés d'au moins deux organes d'isolement en série, avec au moins un organe situé à l'extérieur de l'enceinte de confinement. Les conséquences des brèches sur ces circuits doivent être prises en compte dans la conception des locaux abritant ces circuits, et des mesures de ventilation et de traitement de l'atmosphère doivent être mises en place si nécessaire.

Les possibilités de fuite des circuits véhiculant du fluide radioactif en dehors de l'enceinte de confinement doivent également être prises en compte, notamment pour l'évaluation des conséquences radiologiques lors des incidents et accidents, y compris les accidents avec fusion du cœur.

RECOMMANDATIONS SPECIFIQUES À CERTAINES FONCTIONS DE SÛRETÉ

Maîtrise de la réactivité du cœur :

Arrêt automatique rapide du réacteur : Deux moyens indépendants doivent garantir l'arrêt automatique rapide du réacteur, avec au moins un capable de rendre rapidement le réacteur sous-critique.

Conception neutronique stable : La conception neutronique du cœur doit assurer un comportement stable du cœur, avec des coefficients de vide et de température négatifs pour prévenir les situations critiques.

Détection et arrêt automatique en cas d'évolution anormale : Des dispositifs automatiques doivent assurer un arrêt du réacteur en cas d'évolution anormale des paramètres physiques liés à la réactivité.

Évacuation de la puissance thermique :

Systèmes d'évacuation de la puissance résiduelle : Des systèmes doivent évacuer la puissance résiduelle du cœur après son arrêt dans diverses conditions, assurant le maintien de l'état sûr du réacteur.

Systèmes d'injection d'eau de secours : Des systèmes doivent restaurer et maintenir un inventaire en eau suffisant dans le circuit primaire pour les conditions de fonctionnement et d'accidents.

Dépressurisation du circuit primaire : Des moyens de dépressurisation doivent être prévus pour éviter la fusion du cœur en cas de défaillance des systèmes d'évacuation de la puissance du circuit primaire.

Évacuation de la puissance hors de l'enceinte de confinement : Des systèmes doivent évacuer la puissance résiduelle hors de l'enceinte de confinement sans relâcher de substances radioactives dans l'environnement.

Confinement des substances radioactives :

Dispositifs de confinement statiques et dynamiques : Le confinement des substances radioactives doit être assuré par des dispositifs statiques et, si nécessaire, complétés par des dispositifs dynamiques.

Étanchéité des structures et systèmes de confinement : Les structures et systèmes de confinement doivent être conçus pour assurer l'étanchéité et éviter les fuites directes de substances radioactives.

Surveillance et essais périodiques : Des essais périodiques doivent être effectués pour vérifier l'efficacité du confinement des substances radioactives, avec des dispositions pour surveiller en permanence la concentration des substances radioactives et prendre des mesures préventives en cas d'incident ou d'accident.

AUTRES RECOMMANDATIONS SPECIFIQUES POUR LA CONCEPTION

1. Évacuation de la chaleur : Les systèmes d'évacuation de la chaleur doivent être cohérents avec les exigences des équipements importants pour la sûreté (EIP) qu'ils refroidissent. Des dispositions doivent être prises pour prévenir les risques de défaillance de la source froide et garantir la fiabilité du système.
2. Alimentation électrique : L'installation doit disposer à la fois d'une alimentation électrique normale et d'une alimentation de secours pour assurer la continuité du fonctionnement en cas de défaillance. Des mesures doivent être prises pour réduire les risques de défaillance des composants électriques, notamment par une diversification appropriée.
3. Contrôle du réfrigérant primaire : Des systèmes sont nécessaires pour contrôler les caractéristiques physico-chimiques du réfrigérant primaire, notamment pour limiter la corrosion, maintenir la radioactivité à un niveau aussi bas que possible et minimiser les risques d'explosion d'hydrogène.
4. Manutention et entreposage du combustible : Les systèmes de manutention du combustible doivent être conçus pour assurer l'identification précise des assemblages de combustible, permettre des inspections, prévenir les dommages lors de manutentions et assurer la sécurité en cas d'incidents ou d'accidents. Les bâtiments où se déroulent ces opérations doivent avoir un confinement adéquat.
5. Entreposage à sec des assemblages de combustible neufs : La conception de l'entreposage à sec doit garantir la sûreté, même en cas d'agression. Des mesures doivent être prises pour éviter toute situation de criticité et maintenir des marges de sécurité spécifiées, même en cas d'incidents ou d'accidents
6. Capacité d'entreposage : L'installation doit être conçue pour pouvoir contenir l'intégralité du cœur chargé du réacteur à tout moment, en fonction de la puissance du réacteur, des gestions de combustible prévues et de la durée de fonctionnement prévue.
7. Sûreté : L'entreposage doit garantir l'absence de situation de criticité et de découverture des assemblages de combustible irradiés, ainsi qu'un niveau d'irradiation compatible avec la sécurité des travailleurs, même en cas d'incidents ou d'accidents.
8. Refroidissement : Une piscine d'entreposage doit être équipée d'un système de refroidissement principal pour évacuer la chaleur résiduelle et maintenir les conditions de fonctionnement des systèmes de traitement et de purification de l'eau.
9. Systèmes de secours : En cas de perte totale des systèmes de refroidissement, des systèmes doivent être en place pour éviter le découverture des assemblages de combustible par ébullition et pour maintenir un niveau d'eau adéquat en vue de la remise en service des systèmes de refroidissement.

10. Surveillance et contrôle : Une surveillance permanente du niveau, de la température et de la composition chimique de l'eau de la piscine d'entreposage doit être assurée. Des moyens de détection et de collecte de fuites doivent également être prévus.
11. Conception structurelle : Les compartiments d'entreposage doivent être dimensionnés avec des marges de sécurité suffisantes pour résister aux charges potentielles telles que les séismes, les chutes de charge et les contraintes thermiques.
12. Opérations sur les assemblages de combustible : Les opérations de transport, de manutention et d'entreposage des assemblages de combustible doivent être conçues de manière à exclure toute situation de criticité résultant de leur endommagement.
13. Contrôle-commande : L'architecture du contrôle-commande doit répondre aux exigences de sûreté, en recherchant une indépendance suffisante entre les fonctions et en tenant compte des défaillances plausibles. Une analyse fonctionnelle doit répartir au mieux les actionneurs pour prévenir les situations dangereuses.
14. Instrumentation : Des dispositifs d'instrumentation doivent être prévus pour mesurer les grandeurs caractérisant les réactions nucléaires, l'étanchéité des gaines du combustible, l'efficacité du refroidissement, etc., et pour fournir les informations nécessaires à la conduite sûre de l'installation.
15. Gestion de crise : Des locaux dédiés à la gestion des situations d'urgence doivent être conçus pour résister aux agressions potentielles et assurer l'habitabilité et l'accessibilité des équipes de crise, y compris en cas d'accident avec fusion du cœur.
16. Gestion des effluents et des déchets radioactifs : Des mesures doivent être prises pour limiter la quantité et la nocivité des déchets radioactifs produits par l'installation, ainsi que pour réduire les effluents radioactifs et assurer leur collecte, traitement et rejet sûrs dans l'environnement.