3. Les réacteurs électronucléaires : fonctionnement et sûreté[9]

Centrale nucléaire EDF du Blayais, Gironde
© Copyright EDF – Yohan Espiaube

3.1. Fonctionnement d'une centrale nucléaire

Le fonctionnement d'une centrale nucléaire du type réacteur à eau pressurisée (REP), comme celle du Blayais, repose sur **trois circuits d'eau, indépendants et étanches entre eux**, qui opèrent des échanges thermiques en évitant toute dispersion de substance radioactive vers l'extérieur :

1. **Le circuit primaire** : dans le réacteur, la fission des atomes d'uranium produit une grande quantité de chaleur qui chauffe l'eau qui circule autour des assemblages de combustible à 320°C. L'eau du circuit primaire est maintenue sous pression pour l'empêcher de bouillir. Elle transmet sa chaleur à l'eau d'un deuxième circuit fermé.
2. **Le circuit secondaire** : l'échange de chaleur entre l'eau du circuit primaire et l'eau du circuit secondaire se fait par l'intermédiaire de générateurs de vapeur. L'eau du circuit secondaire se transforme alors en vapeur. La pression de cette vapeur fait tourner une turbine qui entraîne un

[9] Cette partie aborde des notions relatives au fonctionnement des centrales et à la sûreté nucléaire pour une meilleure compréhension des dispositions présentées en parties 4 à 6 de ce document ainsi que dans les autres pièces du dossier.

alternateur. Un transformateur élève la tension du courant électrique produit par l'alternateur pour qu'il puisse être plus facilement transporté à longues distances dans les lignes très haute tension.

3. **Le circuit de refroidissement :** à la sortie de la turbine, la vapeur du circuit secondaire est à nouveau transformée en eau, grâce à un condenseur dans lequel circule de l'eau froide prélevée en mer, en estuaire (comme c'est le cas pour la centrale du Blayais) ou dans un cours d'eau.

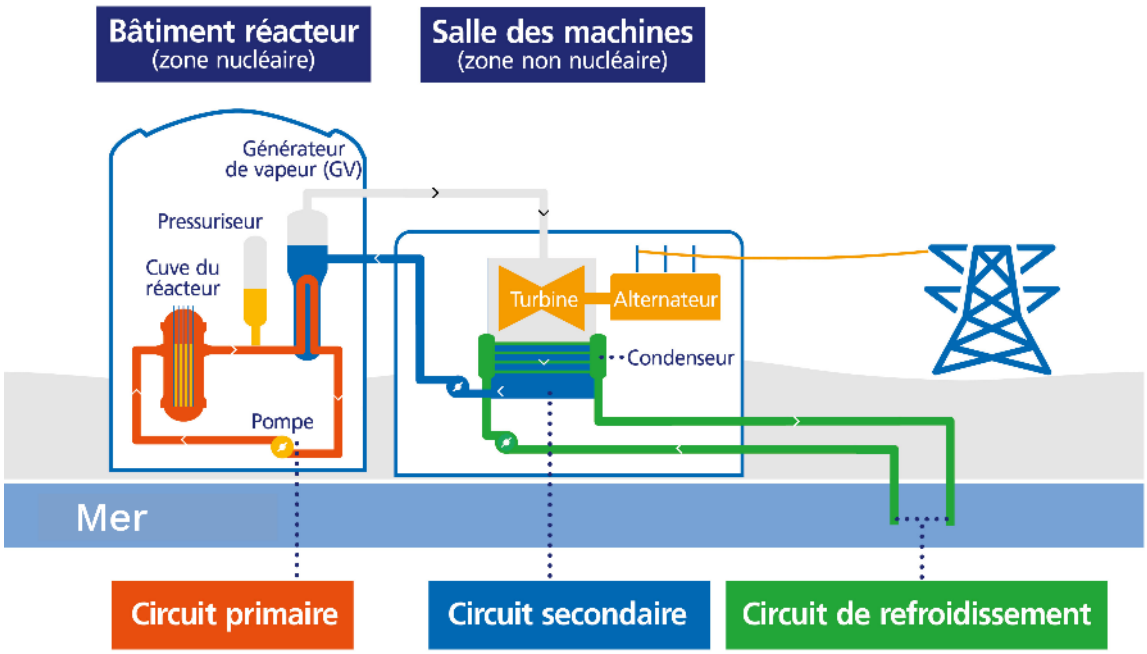


Figure 5. Schéma de principe de fonctionnement de la centrale nucléaire, sans aéroréfrigérant

3.2. Les fondamentaux de sûreté

3.2.1. Les trois barrières de confinement

Dans une centrale nucléaire, un objectif général de la sûreté nucléaire est d'établir et de maintenir une défense efficace pour prévenir les accidents et en limiter les effets sur l'homme et son environnement.

Les dispositions de conception et d'exploitation prises à cet effet portent sur la prévention pour éviter qu'une situation anormale ne se produise, et la protection pour limiter les conséquences d'un éventuel accident.

Ainsi, trois barrières physiques, résistantes, étanches et indépendantes concourent au confinement de la radioactivité :

- la gaine des crayons de combustible,
- l'enveloppe du circuit primaire,
- l'enceinte de confinement.

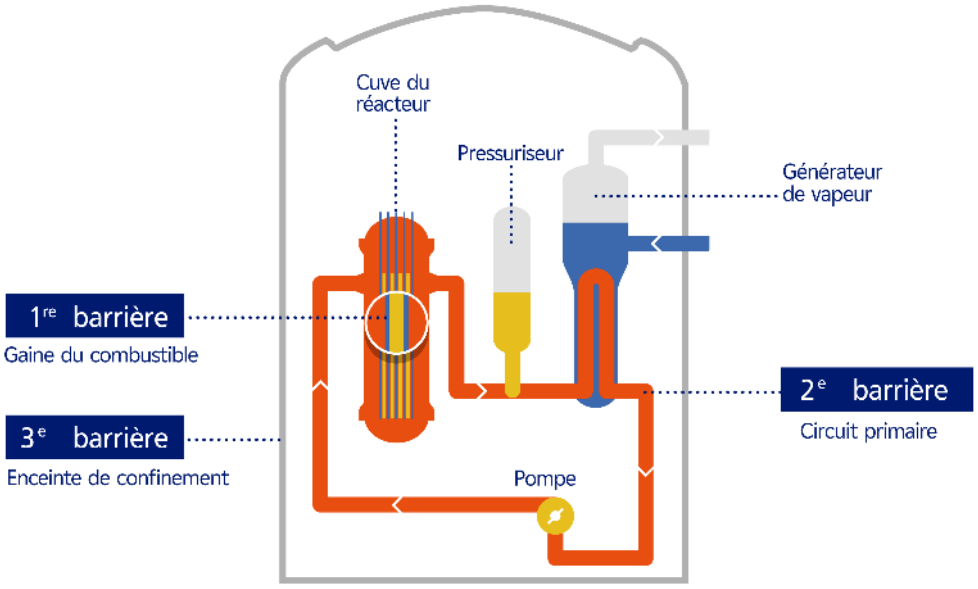


Figure 6. Schéma des trois barrières de confinement

3.2.2. Les trois fonctions de sûreté

Afin d'éviter la dégradation des barrières de confinement et de limiter les conséquences radiologiques de leur détérioration éventuelle, des matériels et systèmes dédiés sont prévus à la conception et mis en œuvre en exploitation : ils assurent les trois « fonctions de sûreté ».

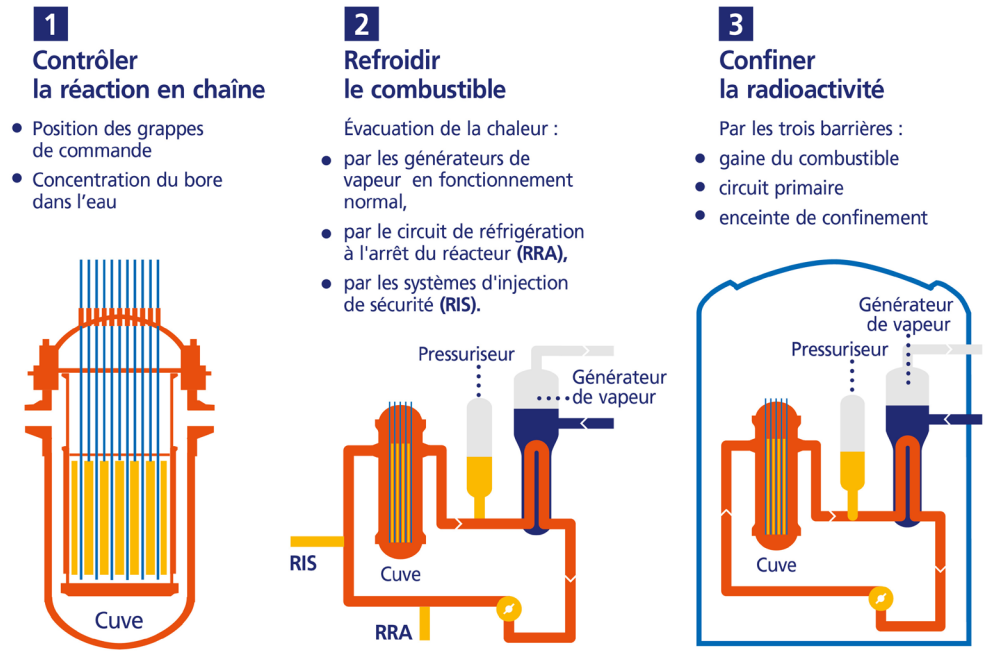


Figure 7. Schéma des trois fonctions de sûreté

L'état « sûr » d'un réacteur se caractérise par la maîtrise des trois fonctions de sûreté :

- contrôle de la réaction nucléaire en chaîne dans le réacteur,
- refroidissement du combustible,
- confinement de la radioactivité,

ainsi que le bon fonctionnement des systèmes nécessaires pour le maintien de ces conditions.

3.2.3. La défense en profondeur

La sûreté nucléaire repose sur le concept de défense en profondeur, qui met en œuvre des niveaux de défense successifs suffisamment indépendants pour se prémunir de défaillances humaines, techniques et organisationnelles.

A la conception et en exploitation, la défense en profondeur se décline en cinq niveaux visant à :

1. **Prévenir les incidents.** Ce premier niveau repose sur une conception robuste et la qualité de fabrication. L'organisation de l'exploitation assure le maintien de l'installation dans les limites du fonctionnement normal. Sur le plan matériel, des automatismes et des systèmes de régulation permettent de maintenir l'installation dans ces limites.
2. **Détecter les incidents,** mettre en œuvre les actions permettant d'empêcher qu'ils ne conduisent à un accident, et rétablir une situation de fonctionnement normal ou, à défaut, atteindre puis maintenir l'installation dans un état sûr.

   Ce deuxième niveau est destiné notamment à assurer l'intégrité de la gaine du combustible (la première barrière) et du circuit primaire (la deuxième barrière) par la mise en œuvre de dispositions et systèmes de protection pour la maîtrise des fonctions de sûreté : arrêt automatique du réacteur, apports additionnels d'eau pour refroidir le réacteur…
3. **Maîtriser les accidents** n'ayant pu être évités, limiter leur aggravation, ramener et maintenir l'installation dans un état sûr.

   Ce troisième niveau repose sur les systèmes de sauvegarde (système d'injection de sécurité du circuit primaire, système d'aspersion de l'enceinte, alimentation de secours des générateurs de vapeur), ainsi que sur les procédures de conduite accidentelle et l'Organisation Nationale de Crise.
4. **Gérer les situations d'accident grave avec fusion du cœur** n'ayant pu être maîtrisées de façon à limiter les conséquences sur les personnes et l'environnement.

   Ce quatrième niveau vise à préserver l'intégrité de l'enceinte de confinement, la troisième barrière. Pour répondre à cet objectif, la conduite des accidents avec fusion du cœur s'appuie sur des dispositions matérielles : les recombineurs passifs pour éliminer le risque d'explosion d'hydrogène formé lors de la fusion de gaines de combustible, des moyens mobiles comme des pompes avec leur alimentation électrique, ou encore le dispositif ultime de filtration des rejets radioactifs mis en œuvre lors de l'ouverture de l'enceinte, ainsi que sur la Force d'Action Rapide du Nucléaire (FARN) issue du retour d'expérience tiré à la suite de l'accident de la centrale de Fukushima Daiichi.

   Relèvent également des niveaux 3 et 4, les équipements dits **«Noyau Dur»** (*cf. détail des modifications au § 4.2.1*), comme le dispositif de stabilisation du corium, ou encore une alimentation électrique supplémentaire.

Le «Noyau Dur» (ND) *est un ensemble de moyens matériels fixes et robustes complétés par des moyens mobiles visant à éviter des rejets radioactifs massifs et des effets durables dans l'environnement pour des situations extrêmes consécutives à une agression naturelle externe extrême. Il s'agit principalement de situation de séisme, d'inondation externe et des phénomènes associés (foudre, grêle, grands vents, pluies de forte intensité), ou encore de la tornade.*

5. **Protéger les populations.** Ce 5e niveau de la défense en profondeur est du ressort des pouvoirs publics et correspond à la mise en œuvre du Plan Particulier d'Intervention (PPI) (mise à l'abri, prise de pastilles d'iodes, évacuations, ...).

3.3. La sûreté sur le terrain

Les fondamentaux de la sûreté nucléaire se déclinent sur le terrain par la mise en œuvre de dispositions prévues à la conception et complétées au fil de l'exploitation, notamment lors des réexamens périodiques en prenant en compte les enseignements du retour d'expérience des centrales nucléaires en France et à l'étranger, ainsi que le progrès des connaissances.

Pour le 4e réexamen des centrales 900 MWe, des dispositions d'amélioration de la sûreté sont ainsi mises en œuvre et envisagées en réponse aux enseignements de l'accident de la centrale de Fukushima Daiichi et plus généralement pour anticiper et faire face à des situations accidentelles extrêmes afin d'éviter des rejets radioactifs massifs et des effets durables dans l'environnement (*cf.* § 3.3.1).

A titre d'illustration, les modes de sollicitations des principales dispositions de sûreté dans le bâtiment réacteur et le bâtiment combustible en situation normale de fonctionnement, en situation incidentelle ou accidentelle, et en cas d'agression externe extrême sont présentées aux §3.3.2, §3.3.3, §3.3.4.

3.3.1. Enseignements de l'accident de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi

Faisant suite à l'accident de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi en mars 2011 au Japon, EDF a étudié un ensemble de dispositions pour renforcer ses installations afin de faire face à des agressions naturelles d'ampleur très au-delà des hypothèses de dimensionnement des réacteurs. Ces dispositions s'articulent ainsi :

› une phase réactive de 2012 à 2015 au cours de laquelle EDF a déployé :

- la force d'action rapide du nucléaire (FARN), composée de 300 agents EDF formés et prêts à intervenir sur tout site nucléaire français le nécessitant, au plus 24 heures après le début de l'accident,

- des matériels locaux fixes et mobiles mis en place avec des points de connexion standardisés (« raccord pompier ») pour alimenter en eau les installations en cas de perte totale des moyens de refroidissement de secours,

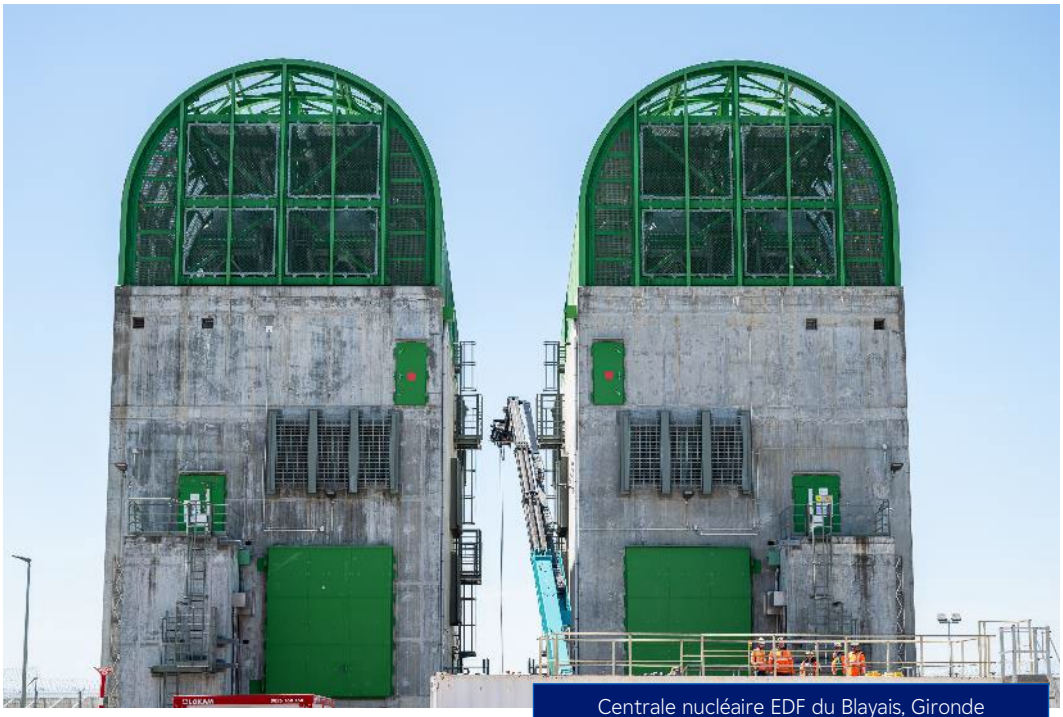
- un plan d'urgence pour faire face à une situation accidentelle affectant plusieurs réacteurs.

› une phase de mise en place de « dispositions pérennes » d'approvisionnement en eau et en électricité, avec notamment :

- sur chaque réacteur, une source électrique de secours supplémentaire : le Diesel d'Ultime Secours (DUS),

- une source d'eau diversifiée (SEG) par l'utilisation de réserves d'eau existantes de grande capacité,

- un renforcement des équipes de conduite des réacteurs (+ 250 personnes sur la France), entraînées à la gestion de l'inattendu.



Centrale nucléaire EDF du Blayais, Gironde
© Copyright EDF – Yohan Espiaube

Figure 8. Photo de deux Diesels d'Ultime Secours (DUS) de 3 MWe

Grâce à ces dispositions, en cas de perte totale des sources électriques ou de la source froide, le combustible situé en bâtiment réacteur ou entreposé en piscine dans le bâtiment combustible (BK), peut continuer à être refroidi pendant 3 jours sans secours externe. Cette autonomie permet à l'Organisation Nationale de Crise, dont la FARN, d'assurer les réalimentations nécessaires, dans la durée jusqu'à la restauration de matériels.

Dans le cadre de la poursuite du fonctionnement au-delà de 40 ans, EDF déploie un ensemble de dispositions matérielles et organisationnelles qui visent à prévenir un accident avec fusion du cœur et éviter des rejets radioactifs massifs et des effets durables dans l'environnement pour des situations extrêmes, dites situations «Noyau Dur», consécutives notamment à une agression naturelle externe extrême. Le «Noyau Dur» est déployé dans le cadre du 4e réexamen périodique et ses suites.

3.3.2. La sûreté dans le bâtiment réacteur

En fonctionnement normal, pour assurer l'intégrité de la première barrière de confinement, le refroidissement du combustible est une fonction de sûreté à maintenir en toute circonstance :

- réacteur en puissance, l'énergie liée à la chaleur dégagée par les assemblages de combustible est transmise par les Générateurs de Vapeur (GV) à la turbine puis au réseau électrique par l'intermédiaire d'un alternateur. A la sortie de la turbine, la vapeur du circuit secondaire est à nouveau transformée en eau grâce à un condenseur refroidi par l'estuaire de la Gironde, afin de poursuivre le cycle vers les GV,
- lorsque le réacteur s'arrête, la puissance thermique résiduelle produite par le cœur est de l'ordre de quelques pour cent de la puissance nominale et va diminuer dans le temps. La chaleur résiduelle produite par les assemblages de combustible est évacuée par le circuit de réfrigération du réacteur à l'arrêt (RRA), lui-même refroidi par la « source froide » (estuaire de la Gironde) *via* le circuit de Refroidissement Intermédiaire (RRI) et le circuit d'eau brute secourue (SEC) qui constituent des barrières successives vis-à-vis de l'eau de l'estuaire.

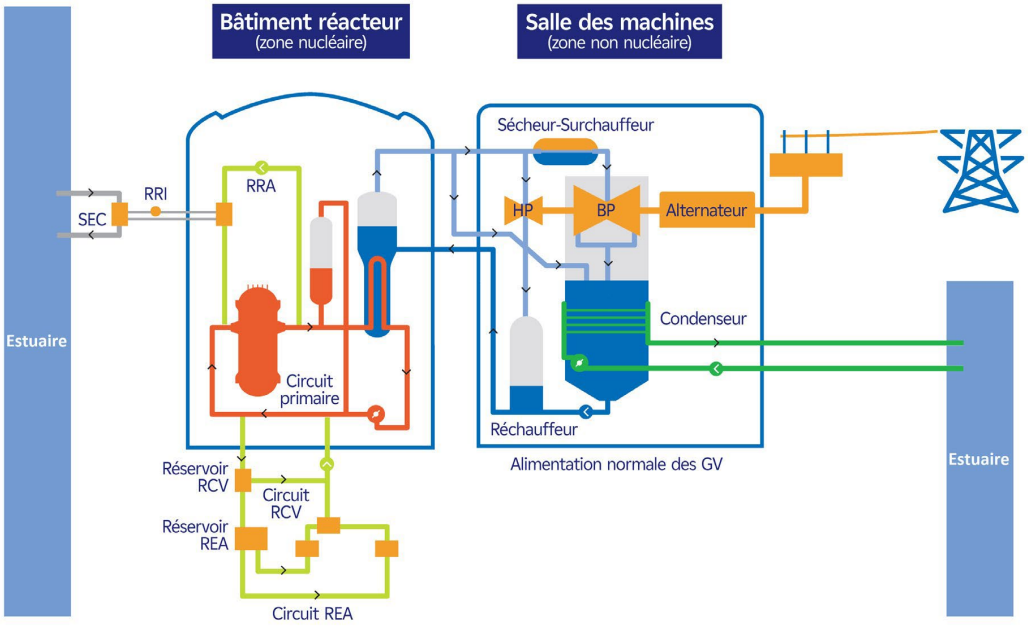


Figure 9. Schéma d'un réacteur en fonctionnement normal : les principaux circuits annexes

En situation accidentelle, le refroidissement du combustible est assuré par :

- les Générateurs de Vapeur (GV), puis par le circuit de réfrigération du réacteur à l'arrêt (RRA) au fur et à mesure du refroidissement et de la dépressurisation du circuit primaire,
- et, en cas de rupture survenant sur le circuit primaire, le système d'injection de sécurité (RIS) intervient pour compenser la perte en eau et poursuivre le refroidissement du cœur. Le système d'aspersion de l'enceinte (EAS) permet de réduire la pression induite par l'évaporation de l'eau du circuit primaire à l'intérieur de l'enceinte de confinement (BR).

En situation d'agression naturelle externe extrême, dite situation «Noyau Dur», l'installation peut connaitre des pertes de fonctionnement de certains matériels, comme ceux liés aux sources électriques et/ou aux systèmes de refroidissement associés à la source froide (estuaire de la Gironde).

Ce sont alors les matériels du «Noyau Dur», qualifiés et robustes aux conséquences de ces situations extrêmes, qui continuent à assurer les fonctions de sûreté.

Dans ces situations extrêmes, une partie de l'alimentation de secours des générateurs de vapeur est qualifiée aux situations «Noyau Dur» pour assurer la fonction de **Refroidissement secondaire du Noyau Dur (ASG-ND).** Ce dernier est alimenté électriquement par le **Diesel d'Ultime Secours (DUS)** et associé à la **source d'eau diversifiée (SEG)**, qui joue alors le rôle de source froide de substitution.

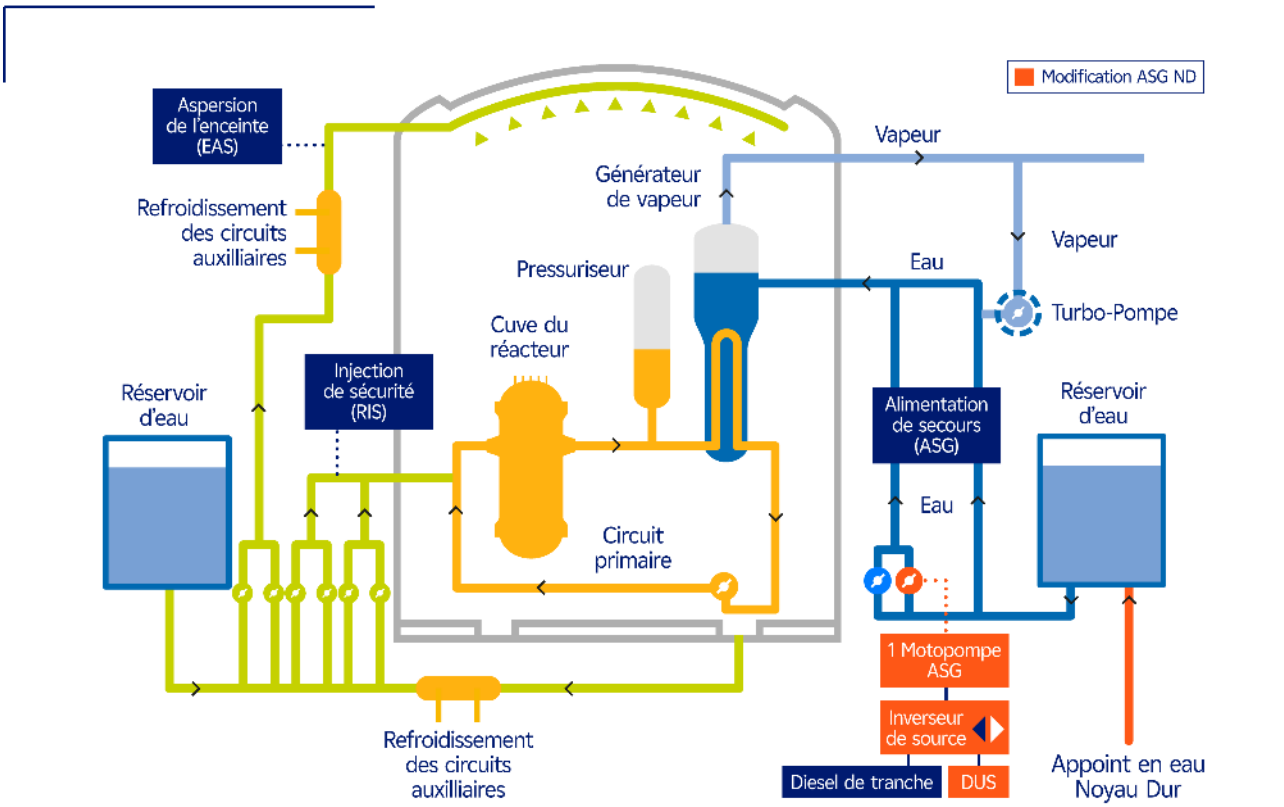


Figure 10. Schéma de l'intégration de la modification ASG-ND

3.3.3. La sûreté dans le bâtiment combustible

La piscine d'entreposage du bâtiment combustible (BK) accueille les assemblages de combustible neufs, avant leur chargement dans le réacteur, et les assemblages déjà utilisés en attente de leur évacuation, ou d'un rechargement.

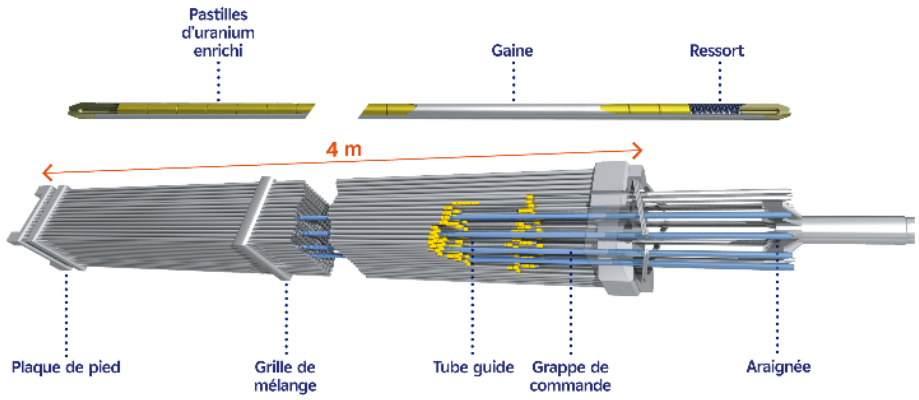


Figure 11. Schéma d'un assemblage combustible

Figure 12. Photo d'une piscine d'entreposage du combustible au sein du bâtiment combustible

En fonctionnement normal :

- la chaleur résiduelle des assemblages de combustible usé entreposés dans la piscine est évacuée par le système de traitement et de refroidissement d'eau des piscines (PTR), refroidi par la source froide (estuaire de la Gironde) via le circuit de refroidissement intermédiaire (RRI) et le circuit d'eau brute secourue (SEC). Le système PTR est composé de 2 voies distinctes (pompe, échangeur) secourues électriquement qui maintiennent en permanence la température de la piscine à moins de 50 °C,
- la piscine d'entreposage du bâtiment combustible (BK) peut être mise en communication avec la piscine du bâtiment réacteur (BR) via le tube de transfert, lors des opérations de chargement et de déchargement du réacteur par exemple. Côté Bâtiment Réacteur, le refroidissement est assuré par le circuit de réfrigération à l'arrêt du réacteur (RRA), lui-même refroidi par la source froide (estuaire de la Gironde) par l'intermédiaire des circuits RRI et SEC.

En situations incidentelles / accidentelles :

- lorsque tout le combustible du réacteur est déchargé dans la piscine du bâtiment combustible l'indisponibilité d'une des deux pompes ou d'un des deux échangeurs peut conduire à une élévation de la température de l'eau de la piscine au-delà de 50°C. Dans ce cas, le refroidissement reste maintenu sans atteindre l'ébullition,
- les situations de vidange accidentelle de la piscine conduisent à l'isolement automatique de la ligne d'aspiration du circuit de refroidissement, afin de maintenir les assemblages de combustible sous eau,
- en cas de perte totale de refroidissement par le système PTR, l'appoint à la piscine est possible par le réseau incendie, ou le système d'eau déminéralisée, afin d'en compenser l'évaporation. Le refroidissement du combustible est correctement assuré car les assemblages restent immergés sous eau, même en cas d'ébullition de l'eau de la piscine.

En situation d'agression naturelle externe extrême, dites situations «Noyau Dur», l'installation peut connaitre des pertes de fonctionnement de certains matériels, potentiellement associés à une situation de perte totale de refroidissement. Ce sont alors les matériels du «Noyau Dur», qualifiés et robustes aux conséquences de ces situations extrêmes, qui continuent à assurer les fonctions de sûreté. Dans ces situations extrêmes :

- la source d'eau diversifiée (SEG) permet de compléter les moyens d'appoint à la piscine du BK, avec des moyens en eau et en électricité indépendants des autres moyens de la tranche. Cet appoint permet de compenser l'évaporation et de maintenir le refroidissement des assemblages de combustible en les maintenant sous eau,

- à long terme, le système de refroidissement supplémentaire (PTR *bis*) permet le retour à une situation de refroidissement de la piscine d'entreposage du bâtiment combustible avec arrêt de l'ébullition.

3.3.4. La sûreté en cas de fusion du combustible

La perte prolongée du refroidissement du cœur du réacteur peut conduire, en l'absence d'eau dans la cuve, à des accidents avec fusion du combustible. En effet, le combustible en cuve pourrait atteindre des températures conduisant à la fusion du métal le constituant (pastilles et gaines), mais également du métal avoisinant (grappes de contrôle, ou structures), jusqu'au percement potentiel du fond de la cuve.

L'agglomérat de métal sous forme d'un liquide visqueux issu de ce processus s'appelle **le corium.**

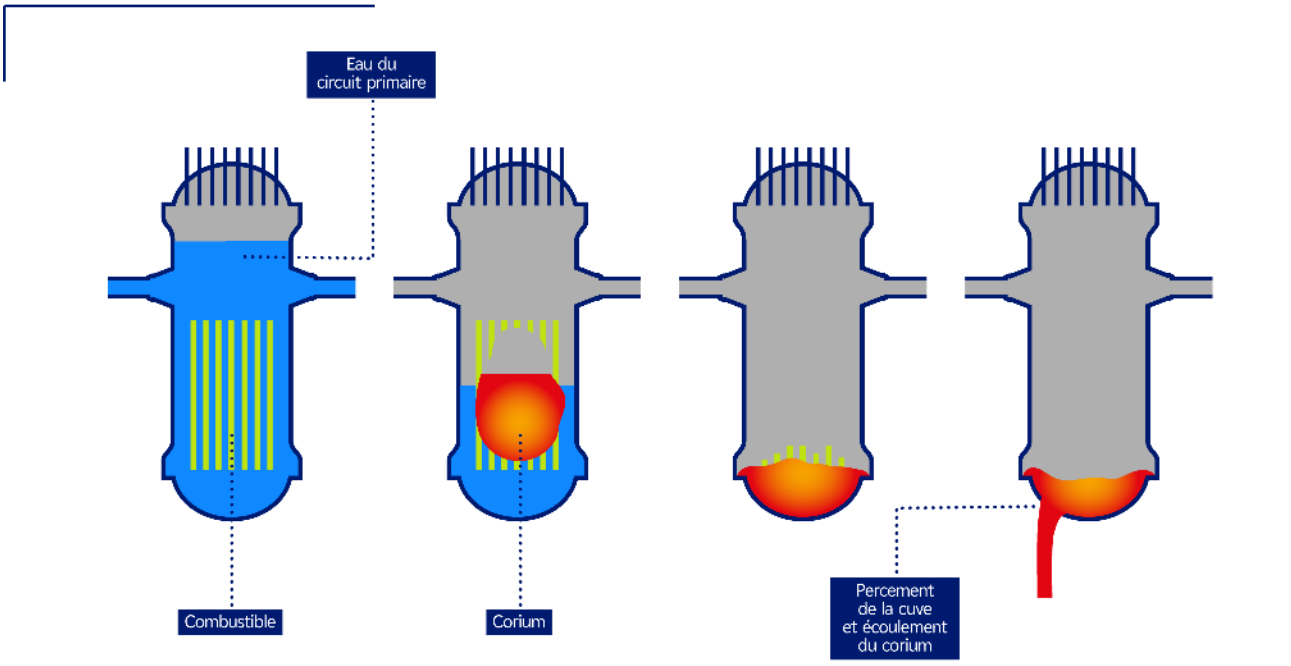


Figure 13. Schéma du processus d'endommagement du réacteur lors d'un accident de fusion du combustible

Dans cette situation, les deux premières barrières de confinement sont endommagées et l'objectif de sûreté est alors de préserver l'étanchéité de la 3e barrière, l'enceinte de confinement, pour éviter la dispersion de produits radioactifs dans l'environnement.

La stratégie de gestion des accidents avec fusion du cœur est inspirée de la démarche mise en œuvre sur l'EPR. Elle vise à laisser le corium s'étaler « à sec », c'est-à-dire en l'absence d'eau, sur le fond du bâtiment réacteur, le radier. Ainsi étalé, il offre une surface d'échange importante et peut être stabilisé par un apport d'eau borée, qui va le refroidir et à terme rendre solide toute la couche de corium étalée.

Cette stratégie vise à :

- garantir l'absence de percée du radier du bâtiment réacteur. En effet le corium, s'il n'est pas stabilisé, provoque un phénomène d'érosion du radier,
- limiter la pressurisation lente de l'enceinte, et donc exclure l'ouverture de l'évent filtré de l'enceinte pour sa décompression,
- maîtriser des phénomènes physiques en accident avec fusion du cœur (risque de

combustion hydrogène notamment). Ainsi, les dispositions « réalisées » en VD4 pour le réacteur n°2 de Blayais sont :

- **la création d'une aire d'étalement à sec du corium** au sein d'une zone de récupération dédiée située sous la cuve du réacteur : zone « Puits de Cuve » et Local d'Instrumentation du Cœur situé dans le prolongement. RÉALISÉ
- **la mise en place du système passif de noyage du corium** constitué d'un dispositif de trappes passives libérant l'eau préalablement injectée dans les puisards du bâtiment réacteur par le système d'aspersion de l'enceinte EAS secouru par les deux diesels de tranche, ou, pour les situations extrêmes, le nouveau dispositif «Noyau Dur» EAS-ND secouru par le Diesel d'Ultime Secours (DUS). RÉALISÉ

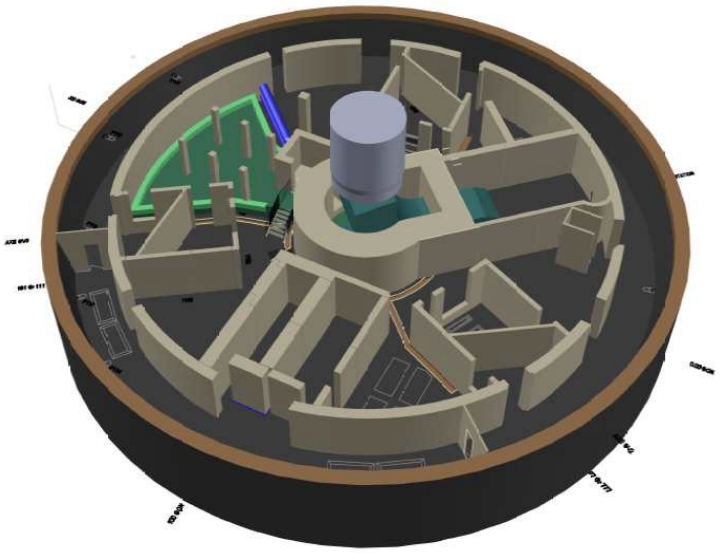


Figure 14. Schéma des locaux (puits de cuve et local d'instrumentation du cœur) utilisés pour l'étalement du corium

Avec ces dispositions, les études effectuées montrent pour le réacteur n°2 de la centrale du Blayais que l'érosion du béton par le corium restera limitée au regard de l'épaisseur du radier du bâtiment réacteur.