



**IRSN**

INSTITUT  
DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

# LE POINT DE VUE DE L'IRSN SUR LA SURETE ET LA RADIOPROTECTION DU PARC ELECTRONUCLEAIRE FRANÇAIS EN 2009

RAPPORT DSR N° 383

DIRECTION DE LA SURETE DES REACTEURS

# SOMMAIRE

<b>AVANT PROPOS</b> .....	<b>2</b>
<b>SOMMAIRE</b> .....	<b>3</b>
<b>INTRODUCTION ET SYNTHESE</b> .....	<b>4</b>
<b>EVALUATION GLOBALE DE LA SURETE DU PARC EN EXPLOITATION</b> .....	<b>7</b>
La sûreté de l'exploitation en 2009 les tendances .....	8
<b>EVENEMENTS ET INCIDENTS</b> .....	<b>19</b>
Vulnérabilités de la « source froide » .....	20
Tassements différentiels à la centrale de Dampierre .....	29
Événements concernant la radioprotection .....	32
Incident survenu lors d'un contrôle de soudure par gammagraphie .....	37
Corrosion des tubes des générateurs de vapeur du réacteur n°3 de la centrale du Bugey .....	42
<b>ANOMALIES GENERIQUES</b> .....	<b>46</b>
Défauts de qualités lors des opérations de maintenance et les non-conformités de matériels aux exigences de qualification.....	47
Fissurations de piquages de faible diamètre .....	50
Mélanges de graisses dans des équipements appelés à fonctionner dans des situations accidentelles .....	54
<b>LES EVOLUTIONS SIGNIFICATIVES</b> .....	<b>57</b>
Évolution des spécifications radiochimiques .....	58
Effet sur la sûreté de l'augmentation du taux de bouchage des tubes de générateurs de vapeur	61
Facteurs organisationnels et humains lors de la conception des modifications d'installations ....	66
<b>DEFINITIONS ET ABREVIATIONS</b> .....	<b>71</b>
<b>CREDIT PHOTO</b> .....	<b>72</b>

Les mots écrits en [bleu et soulignés](#) renvoient à des liens. Ces liens sont actifs sur [www.irsn.fr](http://www.irsn.fr).

# LES EVOLUTIONS SIGNIFICATIVES

Des avancées des connaissances techniques et scientifiques, des faiblesses identifiées ou des leçons tirées du retour d'expérience, un environnement ou une réglementation qui évoluent, des impératifs économiques... autant de raisons qui conduisent à faire évoluer les installations ou leurs modalités d'exploitation. Les réexamens de sûreté, réalisés par les exploitants tous les 10 ans, sont l'un des cadres essentiels pour la mise en œuvre de telles évolutions. Certaines modifications ou évolutions nécessitent parfois plusieurs années de réflexions et d'études avant leur définition précise et leur mise en place. D'autres nécessitent une mise en œuvre plus rapide pour répondre à des contraintes d'exploitation. Durant l'année 2009, plusieurs évolutions significatives ont été examinées par l'IRSN ; certaines sont exposées ci-après.

La radioactivité volumique du fluide circulant dans certains circuits des réacteurs doit respecter des critères et des limites définis par les spécifications radiochimiques. La dégradation de crayons combustibles dans les réacteurs des 1300 MWe a conduit EDF à renforcer les spécifications pour ces réacteurs au début des années 2000. Ce type de dégradation étant considéré comme maîtrisé aujourd'hui, EDF a souhaité revenir à des spécifications communes à l'ensemble des réacteurs du parc électronucléaire français.

Afin de réduire le risque de rejets radioactifs dans l'environnement en cas de fuites de tubes de générateurs de vapeur, EDF procède au bouchage préventif des tubes présentant une anomalie et des tubes avoisinant ces derniers. Cependant, les taux de bouchage de plus en plus élevés ainsi atteints au fil des années ont un impact significatif sur le fonctionnement des installations concernées. L'IRSN est ainsi appelé à se prononcer sur l'acceptabilité, du point de vue de la sûreté, des taux de bouchage des tubes des générateurs de vapeur.

**La prise en compte des facteurs organisationnels et humains lors de la conception des modifications est primordiale pour une exploitation sûre des installations.** Dans le cadre des réexamens de sûreté associés aux visites décennales des réacteurs, EDF engage des volumes significatifs de modifications de ses centrales. Ces modifications introduisent des changements techniques, documentaires ou organisationnels qui ont une incidence sur les pratiques d'exploitation. L'IRSN a évalué les dispositions mises en œuvre par EDF pour prendre en compte ces facteurs.

---

# Évolution des spécifications radiochimiques

---

La radioactivité du fluide circulant dans certains circuits, et en particulier dans le circuit primaire, doit respecter des critères définis par les spécifications radiochimiques. Celles-ci fixent les limites à respecter pour chacun des circuits concernés ; elles ont été renforcées pour les réacteurs de 1300 MWe au début des années 2000 à la suite de la constatation de dégradations de crayons combustibles. Le type de dégradations correspondant étant considéré comme maîtrisé aujourd'hui, EDF a souhaité revenir à des spécifications communes à l'ensemble des réacteurs du parc. L'important travail d'analyse réalisé par l'IRSN a permis une amélioration des connaissances concernant la surveillance de la radioactivité du fluide primaire et l'a conduit à recommander le maintien des critères renforcés.

## Que sont les spécifications radiochimiques ?

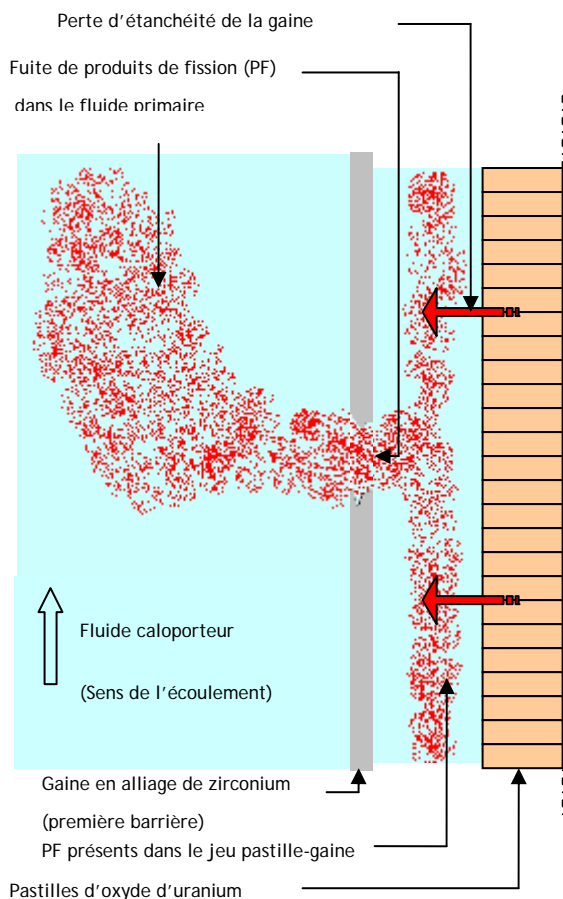
L'ensemble des paramètres radiochimiques à contrôler et les modalités de ces contrôles sont consignés dans un document désigné par « spécifications radiochimiques », qui fait partie des Règles Générales d'Exploitation (RGE).

Parmi les nombreux paramètres contrôlés, figurent un certain nombre d'indicateurs qui ont un rôle bien précis. Par exemple, la teneur en gaz de fission dans le circuit primaire (indicateur « Somme des gaz ») est utilisée pour la surveillance de l'étanchéité de la première « barrière » (gaines de combustible). L'indicateur mesurant l'activité de l'iode 134 dans l'eau du circuit primaire, quant à lui, permet de détecter une éventuelle dissémination de matière fissile dans ce circuit.

Tous ces contrôles sont réalisés selon une fréquence et dans des conditions clairement définies. En particulier, un prélèvement de fluide primaire est réalisé régulièrement afin de réaliser une analyse par spectrométrie gamma dans un laboratoire de chimie de la centrale. Les valeurs des deux indicateurs cités ci-dessus sont notamment déterminées et confrontées aux seuils prescrits dans les spécifications radiochimiques. En cas de dépassement d'un seuil, des mesures correctives graduées, pouvant aller jusqu'à l'arrêt du réacteur, sont mises en œuvre.

Les radioéléments formés par les fissions nucléaires dans les pastilles d'oxyde d'uranium doivent normalement rester confinés à l'intérieur des crayons combustibles. Ceci est possible grâce aux gaines d'étanchéité des crayons combustibles en alliage de zirconium, qui constituent la première « barrière » entre le combustible et l'environnement. Or, sur les dizaines de milliers de crayons combustibles qui composent le cœur d'un réacteur nucléaire, il peut arriver que l'étanchéité des gaines de certains crayons soit affectée. Les causes possibles sont diverses : présence dans le circuit primaire de corps migrants qui peuvent endommager les crayons, usures par frottement, défauts de fabrication...

Les corps migrants sont des corps présents dans un circuit (par exemple le circuit primaire), à la suite d'erreurs humaines lors des activités d'exploitation (chute d'objet) ou de défaillances de matériels, susceptibles d'agresser les composants du circuit



En cas de défaut d'étanchéité d'une gaine, les **produits de fission**, jusque-là contenus dans le jeu entre les pastilles et la gaine, sont relâchés dans le fluide primaire, et peuvent se retrouver dans divers circuits du réacteur. La radioactivité du fluide primaire fait l'objet d'une surveillance stricte, afin de limiter les conséquences d'une éventuelle rupture de la première barrière en termes de sûreté de l'installation (par exemple en cas de [rupture de tubes de générateur de vapeur](#)), de radioprotection des travailleurs et de protection de l'environnement.

### Le phénomène de « fretting » dans les réacteurs de 1300 MWe

A la suite de nombreuses pertes d'étanchéité de gaines de crayons combustibles survenues au début des années 2000 dans les réacteurs de 1300 MWe, avec en particulier la perte d'étanchéité de 92 crayons du réacteur n°3 de la centrale de Cattenom en 2000, EDF a mené des études pour identifier la cause de ces défaillances récurrentes. Un affaiblissement des ressorts de la grille inférieure de certains assemblages a alors été mis en évidence, conduisant à un percement de gaines par un phénomène d'usure vibratoire.

Ce phénomène, dénommé « fretting » par EDF (abréviation de « fretting corrosion »), s'est révélé constituer un problème générique pour les réacteurs de 1300 MWe. L'analyse de l'IRSN a alors conduit l'ASN à demander un renforcement des spécifications radiochimiques de ce type de réacteurs ; cela s'est notamment traduit par la prescription, en 2003, de seuils plus sévères associés aux deux indicateurs évoqués plus haut.

### Vers une homogénéisation des spécifications radiochimiques des différents types de réacteurs ?

EDF a proposé en 2008 une nouvelle actualisation des spécifications radiochimiques des réacteurs de 1300 MWe. S'appuyant notamment sur le fait qu'un nouveau type d'assemblage renforcé a été introduit dans les réacteurs concernés, EDF considère que le phénomène de « fretting » est désormais maîtrisé. En pratique, aucune nouvelle perte d'étanchéité par « fretting » n'ayant été détectée sur les assemblages de ce type, EDF a souhaité revenir à des spécifications radiochimiques identiques pour les différents types de réacteurs à eau sous pression exploités en France. Cela se traduirait, entre autres, par le relèvement des limites associées aux indicateurs « Somme des Gaz » et « Iode 134 ».

#### Assemblage combustible « renforcé »

Un assemblage dit « renforcé » est muni d'une grille de renfort implantée dans la partie basse de l'assemblage de façon à supprimer le risque d'usure vibratoire des crayons combustibles. Les deux constructeurs AREVA et WESTINGHOUSE proposent aujourd'hui ce type d'assemblages, qui équipe désormais en très grande majorité les réacteurs français de 1300 MWe.



*Assemblage renforcé, avec notamment sa grille de renfort en partie basse*

#### Analyse de l'IRSN

Sur la base des relevés radiochimiques transmis par EDF pour l'ensemble des réacteurs de 1300 MWe, l'IRSN a réalisé une analyse statistique approfondie en confrontant notamment ces données aux nouveaux seuils proposés. Cet examen a été mené en regard des différents intérêts définis dans la loi n°2006-686 relative à la Transparence et à la Sécurité en matière Nucléaire ([loi TSN](#)) du 13 juin 2006, à savoir la sûreté, la radioprotection et la protection de l'environnement.

Il en est principalement ressorti que les seuils renforcés mis en œuvre pour les réacteurs de 1300 MWe n'entraînaient pas de contraintes particulières pour l'exploitation de ces réacteurs, et jouaient pleinement leur rôle de limitation de la pollution radiologique du circuit primaire. A cet égard, selon l'IRSN, l'objectif premier des spécifications radiochimiques est de borner le domaine de fonctionnement normal des réacteurs, de prévenir des transferts excessifs de radioactivité dans l'environnement en cas d'incident ou d'accident, et de prescrire la conduite à tenir en cas d'évolution anormale de paramètres et indicateurs ; ceci limite à des valeurs aussi basses que raisonnablement possible l'effet d'une pollution radioactive, conformément aux exigences de la loi TSN. L'IRSN souligne que le rôle des spécifications radiochimiques n'est pas seulement de gérer l'activité dans les différents circuits susceptibles d'être contaminés, mais aussi et surtout d'anticiper tout risque pour ne pas parvenir à une telle situation. Par ailleurs, si l'augmentation de la radioactivité du fluide primaire du fait de la perte d'étanchéité de la gaine est limitée par les spécifications radiochimiques, l'IRSN considère que l'objectif à viser est d'approcher au plus près le « zéro défaut » dans les gaines des crayons combustibles. Les bons résultats obtenus par EDF quant au respect des spécifications radiochimiques traduisent incontestablement une gestion appropriée de ces réacteurs. Ils ne doivent pas, selon l'IRSN, être utilisés comme un argument pour une relaxation des seuils associés à certains indicateurs. Aussi, l'IRSN a préconisé le maintien des seuils associés aux indicateurs « Somme des gaz » et « Iode 134 », ainsi qu'une réflexion approfondie sur le bien-fondé des seuils associés à d'autres indicateurs.

Le travail important réalisé par l'IRSN a permis une amélioration des connaissances concernant la surveillance de la radioactivité du fluide primaire des réacteurs de 1300 MWe. Cette analyse s'est révélée si riche d'enseignements que l'IRSN l'a étendue à l'ensemble des 58 réacteurs qui composent le parc électronucléaire français.

#### Suites du dossier

L'ASN a repris les conclusions de l'IRSN, parmi lesquelles le maintien des seuils associés aux deux indicateurs radiochimiques « Somme des gaz » et « Iode 134 » pour les réacteurs de 1300 MWe. L'instruction se poursuit néanmoins, EDF ayant formulé de nouvelles propositions au début de l'année 2010.

---

# Effet sur la sûreté de l'augmentation du taux de bouchage des tubes de générateurs de vapeur

---

Les milliers de tubes des générateurs de vapeur transfèrent la chaleur du circuit primaire au circuit secondaire. Leur rôle est essentiel en termes de confinement des produits radioactifs contenus dans le circuit primaire ; en cas de fuite de l'un de ces tubes, il existe un risque de rejet radioactif dans l'environnement. C'est pourquoi, afin de réduire ce risque, EDF obture préventivement certains tubes. Cependant, le nombre de tubes bouchés au fil des années finit par avoir un effet sur le fonctionnement de l'installation. L'IRSN est amené à se prononcer sur l'acceptabilité, du point de vue de la sûreté, de taux de bouchage de plus en plus élevés des tubes des générateurs de vapeur.

## Le contexte

Les générateurs de vapeur (GV) sont des échangeurs thermiques constitués de plusieurs milliers de tubes à l'intérieur desquels circule l'eau du circuit primaire (voir *Figure 1*). Ils extraient ainsi la chaleur produite par le combustible et alimentent en vapeur la turbine de l'alternateur. Dans le circuit primaire, l'eau est radioactive, dans les limites fixées par les spécifications radiochimiques (voir article précédent). Les tubes des GV ont la particularité de constituer une part de la seconde et une part de la troisième barrière de confinement, la première étant constituée par les gaines du combustible. En conséquence, une fuite du circuit primaire dans le circuit secondaire à travers les tubes des GV conduit à la présence d'eau primaire, qui peut être radioactive, à l'extérieur du bâtiment du réacteur.

A l'étranger, plusieurs [ruptures de tube de générateur de vapeur \(RTGV\)](#) se sont produites et ont conduit dans certains cas à des rejets radioactifs dans l'environnement. En France, plusieurs cas de fuite notable de tubes se sont produits, sans jamais aller jusqu'à la rupture des tubes affectés (réacteurs n°1 et n°4 de la centrale de Cruas ([voir rapport relatif à l'année 2007](#)), réacteur n°2 de la centrale de Fessenheim ([voir rapport relatif à l'année 2008](#))). Ces fuites ont conduit à la mise à l'arrêt rapide des réacteurs concernés mais ont néanmoins entraîné des relâchements de vapeur légèrement tritiée (contenant du tritium radioactif) dans l'atmosphère. Les contrôles effectués dans l'environnement n'ont pas mis en évidence de trace notable de contamination.

Malgré les dispositions prises lors de la conception et de la fabrication des GV, un tube peut se dégrader en exploitation. En effet, l'épaisseur d'un tube de GV est de l'ordre du millimètre ce qui le rend vulnérable à la corrosion. De par leur conception, certains GV sont davantage sujets à ce risque (voir l'article sur la corrosion des tubes des générateurs de vapeur du réacteur n°3 de la centrale du Bugey).

Compte tenu des risques de rejets radioactifs associés, la probabilité de fuite des tubes de GV doit rester faible. Pour éviter une rupture de tubes, EDF surveille l'état des tubes de chaque GV (le faisceau tubulaire) en

fonctionnement et lors des arrêts pour maintenance. A titre préventif, EDF peut procéder au bouchage de tubes GV (désigné par « BTGV ») lors de chaque arrêt de réacteur (voir Figure 2). Après plusieurs dizaines d'années d'exploitation, certains GV peuvent atteindre des taux de bouchage importants (plusieurs centaines de tubes sont bouchés). De plus, les études de sûreté supposant des taux de bouchages relativement homogènes entre GV, EDF peut être amené à réaliser des bouchages de tubes sains afin de réduire une éventuelle disparité entre GV.

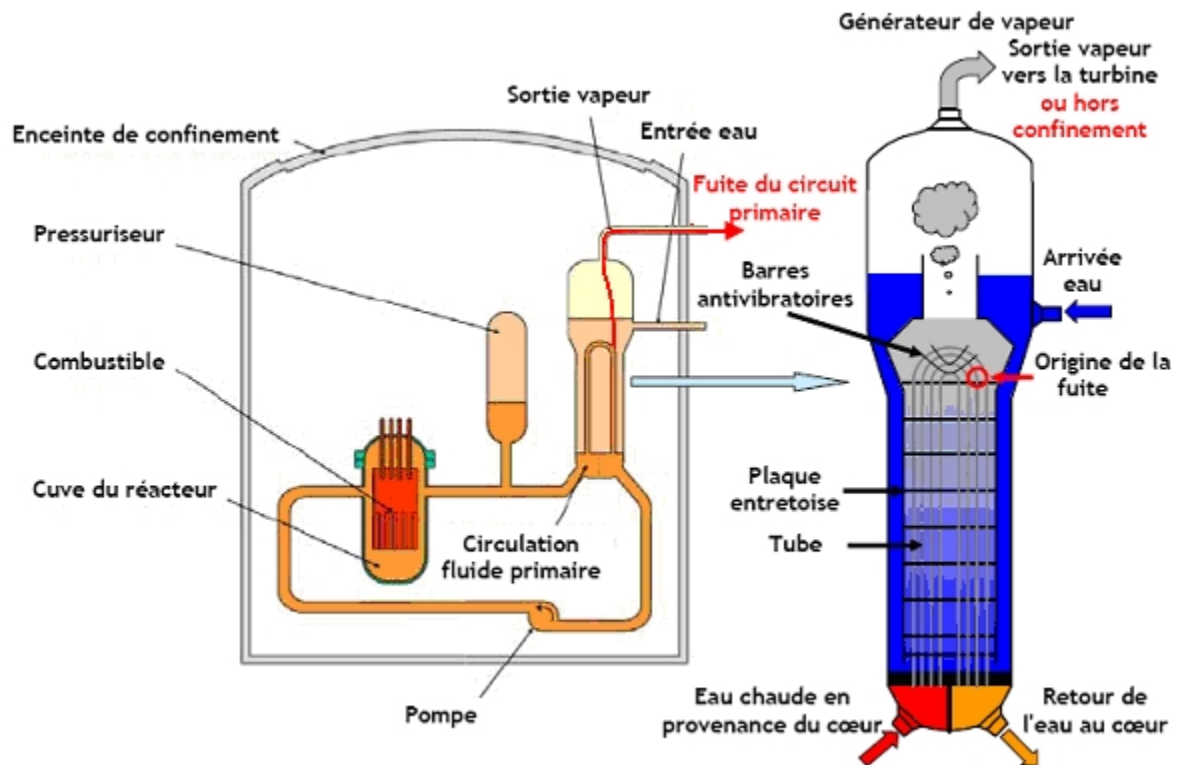


Figure 1 - Schéma simplifié illustrant une fuite d'un tube de GV.

Certains problèmes liés aux GV ont particulièrement marqué l'actualité de l'année 2009. Sur le réacteur de [n°3 de la centrale du Bugey, un nouveau mode de corrosion des tubes de GV](#) a été mis en évidence, entraînant la mise hors service par bouchage d'un nombre important de tubes. De même, pour le réacteur de la centrale de Chinon B, du fait d'une éventualité de bouchage d'un nombre important de tubes d'un des trois GV pendant l'arrêt de 2009, EDF a analysé l'effet d'un taux de bouchage enveloppe de 18,5 % sur les études de sûreté visant à démontrer la suffisance du refroidissement assuré par les GV en situation accidentelle.

Plus le taux de bouchage des GV est important, plus leurs performances sont dégradées et plus les conséquences sur le fonctionnement du réacteur sont importantes, à la fois en situation normale et dans les conditions accidentelles. Ces conséquences amènent EDF à remplacer progressivement les GV, les 3 ou 4 GV équipant un réacteur étant remplacés en même temps.

#### Différents types de générateurs de vapeur

Différents types de GV sont utilisés sur le parc en exploitation. Le type de GV dépend de l'année de mise en service du réacteur et de l'éventuel remplacement survenu depuis. Lors de leur mise en exploitation, les premiers réacteurs de 900 MWe étaient équipés de GV dont les tubes étaient en alliage Inconel 600. Les conditions



d'exploitation, notamment les propriétés du milieu aqueux, ont conduit à des corrosions sous contrainte de cet alliage, inégales selon les GV et les réacteurs. Des fissures circonférentielles importantes ont par exemple été détectées récemment dans les tubes des GV du réacteur n°3 de Bugey.

L'alliage de type Inconel 600 s'étant rapidement révélé particulièrement sensible à la corrosion, EDF a décidé, dès 1984, d'appliquer un traitement thermique aux tubes des GV en cours de fabrication. Les GV dont le faisceau tubulaire a été traité thermiquement équipent ainsi les derniers réacteurs de 900MWe et les premiers réacteurs de 1300 MWe.

Le traitement thermique étant à l'expérience moins efficace qu'espéré, EDF a décidé d'utiliser à partir de 1990 un nouvel alliage de type Inconel 690 tout en conservant le traitement thermique. Les GV de type 690TT équipent les derniers réacteurs de 1300 MWe et les réacteurs de 1450 MWe. Cet alliage est aussi utilisé dans les GV de remplacement.

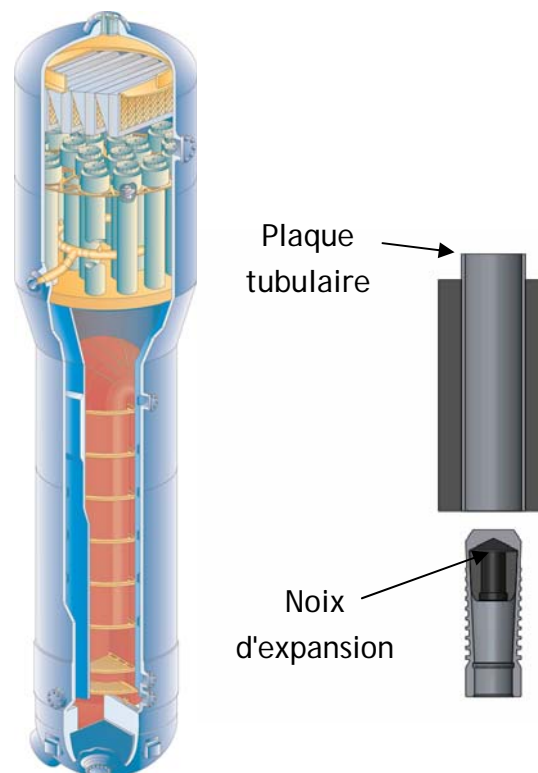


Figure 2 - Bouchage d'un tube de GV.

### État du parc

L'état du parc est résumé dans le tableau ci-dessous.

Palier	900 MWe/CPO (3 GV)	900 MWe/CPY (3 GV)	1300 MWe (4 GV)	1450 MWe (4GV)
Nombre de réacteurs	6	28	20	4
dont GV d'origine	1	13	20	4
dont GV remplacés	5	15	0	0
% max de tubes bouchés *	17,95 %	14,67 %	5,11 %	0,20 %
Écart max de taux de bouchage entre GV d'un même réacteur *	9,98 %	4,53 %	5,00 %	0,20 %

Tableau 1 - États des remplacements GV sur le parc d'EDF au 1er décembre 2010 et état des BTGV (\* État au 26 octobre 2009)

### Effet du nombre de tubes bouchés sur le fonctionnement du réacteur

Les études en support des rapports de sûreté des réacteurs sont réalisées en retenant un certain nombre d'hypothèses qui doivent être respectées au cours de leur exploitation. Le BTGV et le débit primaire font partie de ces hypothèses.

#### Effet sur le débit et sur le volume d'eau primaire

Le bouchage de tubes de GV réduit la section de passage du fluide dans le faisceau tubulaire correspondant. Il entraîne ainsi une augmentation des pertes de charge dans les tubes GV et par conséquent une réduction du débit de fluide primaire. L'augmentation du taux de bouchage des tubes de GV se traduit également par une légère diminution de la quantité d'eau dans le circuit primaire.

#### Effet sur les échanges thermiques

Les GV produisent de la vapeur utilisée pour actionner la turbine. La pression du circuit secondaire est la pression d'équilibre entre les phases liquide et vapeur de l'eau à la température de fonctionnement de ce circuit. Le bouchage de tubes GV conduit à une réduction de la surface d'échange entre le circuit primaire et le circuit secondaire. A puissance à évacuer inchangée, la température du fluide primaire restant constante, il est nécessaire de diminuer la température du fluide secondaire, et donc sa pression, de façon à favoriser les transferts de chaleur au travers du faisceau tubulaire des GV. Cependant, la pression du fluide secondaire ne pouvant pas être diminuée en deçà d'une valeur spécifiée afin de respecter certaines hypothèses des études de sûreté (comme la différence de pression entre le circuit primaire et le circuit secondaire), l'exploitant peut être conduit à limiter la puissance du réacteur.

#### Effet sur la sûreté

EDF est amené à justifier l'effet sur la sûreté des bouchages de tubes, soit dans le cadre de dossiers génériques fixant des limitations en termes de taux de bouchage et de débit de fluide primaire, soit dans le cadre de dossiers ponctuels relatifs au dépassement de ces limitations pour certains réacteurs particulièrement affectés.

L'effet du bouchage des tubes de GV est variable selon les études de sûreté considérées. Si le bouchage peut avoir une incidence bénéfique pour les accidents entraînant un refroidissement du fluide primaire, il a par contre un effet négatif pour les accidents entraînant un échauffement du fluide primaire, effet qu'il convient d'examiner.

Par exemple, pour la perte totale des alimentations électriques externes, le phénomène redouté est une « crise d'ébullition » dans le cœur du réacteur, entraînant un mauvais refroidissement des zones les plus chaudes de ce cœur, avec des risques de dégradations de crayons combustibles. Le phénomène est particulièrement sensible au débit et à la température du fluide primaire. L'augmentation du taux de bouchage des tubes de GV entraîne une augmentation des pertes de charge dans le circuit primaire, ce qui accélère la décroissance du débit après l'arrêt des pompes de ce circuit lors de l'accident. De plus, la diminution de la surface d'échange entre les circuits primaire et secondaire due à une augmentation du bouchage réduit la capacité d'échange de chaleur et participe donc à l'augmentation de la température moyenne de l'eau du circuit primaire, ce qui accroît le risque de « crise d'ébullition ».

L'accident de perte de réfrigérant primaire consiste en une rupture partielle ou totale de l'enveloppe du circuit primaire du réacteur (hors cuve). Le circuit primaire se vide alors de l'eau qu'il contient, plus ou moins rapidement selon la taille de la brèche. Le phénomène redouté est un découverture prolongé des crayons combustibles, ce qui risque de conduire à la fusion du cœur.

Le bouchage de tubes de GV influe sur certaines hypothèses des études de cet accident :

- les caractéristiques de fonctionnement du circuit secondaire ;
- la surface d'échange entre circuit primaire et circuit secondaire ;
- la quantité d'eau primaire présente avant l'accident.

Ainsi, un bouchage important induit une masse d'eau moindre dans le circuit primaire. Au cours de l'accident, le niveau d'eau dans le cœur du réacteur diminue donc plus rapidement, le découverture du cœur est plus précoce et les gaines des crayons combustibles s'échauffent d'autant plus. Cependant, la dépressurisation du circuit primaire est plus rapide et l'injection d'eau dans le cœur par les systèmes de secours intervient de façon plus précoce. Les études d'accident permettent de déterminer lequel de ces deux effets est prépondérant par rapport à l'autre lors du déroulement de l'accident.

L'IRSN est dès lors régulièrement amené à étudier les modifications apportées par EDF aux études de sûreté et aux règles générales d'exploitation au fur et à mesure de l'augmentation des taux de BTGV des réacteurs. Pour les réacteurs de 900 MWe, l'IRSN a examiné différents dossiers successifs justifiant la sûreté d'exploitation pour des taux de bouchage compris entre 10 % et 20 %. Dans le cas du réacteur n°3 de la centrale du Bugey, EDF a été amené à présenter un dossier avec un taux de bouchage enveloppe de 22,5 %.

Par ailleurs, l'IRSN a souligné l'effet d'un déséquilibre de bouchage entre les GV d'un même réacteur. Ceci a conduit EDF à présenter de nouveaux dossiers afin de compléter la démonstration de la sûreté d'exploitation des réacteurs concernés dans cette configuration.

#### **Politique de remplacement des GV d'EDF**

EDF a prévu de remplacer les générateurs de vapeur des réacteurs de 1300 MWe, dès leur troisième visite décennale (VD3) pour certains réacteurs, au plus tard lors de leur quatrième visite décennale (VD4) selon l'état des GV. Pour les réacteurs de 900 MWe, après la fin, en 2012, du remplacement d'ores et déjà prévu des GV avec des tubes en Inconel 600 d'origine, EDF poursuivra les remplacements des GV avec des tubes en Inconel 600 traité thermiquement (huit tranches concernées) ; les derniers réacteurs verront leurs GV remplacés lors des VD4.

Ce programme conduit EDF à porter le rythme de remplacement des GV à deux tranches par an. Chaque remplacement de GV fait l'objet d'une analyse approfondie par l'IRSN.

Quelles que soient les conclusions des études de sûreté faites avec des taux de bouchages accrus, l'IRSN souligne qu'un taux de bouchage élevé est le signe d'une dégradation globale du faisceau tubulaire et donc, malgré les bouchages effectués, d'un accroissement du risque de ruptures de tube de générateur de vapeur, accident qui conduit à des rejets radioactifs dans l'environnement.

---

# Facteurs organisationnels et humains lors de la conception des modifications d'installations

---

**La prise en compte des facteurs organisationnels et humains lors de la conception de modifications est primordiale pour une exploitation sûre des installations.** Dans le cadre des réexamens de sûreté associés aux visites décennales des réacteurs, EDF engage un volume significatif de modifications de ses centrales. Ces modifications peuvent introduire des changements techniques, documentaires ou organisationnels qui ont une influence sur les pratiques d'exploitation.

## Un sujet suivi par l'IRSN depuis le début des années 2000

La sûreté d'une centrale nucléaire repose, entre autres, sur la fiabilité de ses équipements dans les conditions normales d'exploitation ou dans des conditions dégradées voire accidentelles, et sur les pratiques d'exploitation développées par ceux qui conduisent les installations et assurent leur maintenance. Lors des visites décennales associées aux réexamens de sûreté périodiques, l'exploitant est amené à implanter des modifications qui concernent par exemple la rénovation d'équipements, la mise en conformité de certains systèmes à de nouvelles exigences, ou encore l'amélioration de la productivité ou de la sûreté. Ces modifications sont susceptibles de déstabiliser les pratiques des opérateurs et d'être alors de nouvelles sources d'erreurs. La prise en compte des contraintes d'utilisation des matériels, du contexte d'exploitation et des changements induits par ces modifications dans l'organisation et la documentation est donc un élément sensible du processus de conception des modifications.

Après un premier examen par l'IRSN de l'intégration des facteurs humains dans la conception des modifications techniques et documentaires des réacteurs, l'institut avait conclu qu'EDF devait définir et déployer une démarche structurée pour prendre en compte les facteurs organisationnels et humains lors de la conception des modifications d'installations. En 2009, l'IRSN a analysé la démarche mise en œuvre par EDF et son déploiement dans les différentes unités d'ingénierie d'EDF et dans les centrales.

## La conception des modifications à EDF

Schématiquement, la conduite d'une évolution - modification technique, documentaire ou organisationnelle - suit le processus générique suivant :

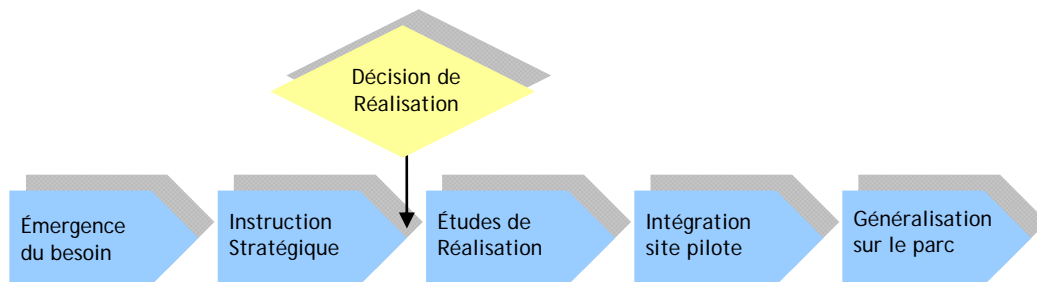


Figure 1 : Le processus générique de conception des modifications à EDF

Les unités d'ingénierie d'EDF ont été réorganisées en 2006 dans le but de simplifier les processus relatifs aux modifications techniques et documentaires et de clarifier les domaines de responsabilité de ces unités. Actuellement, cinq unités de la Division de l'Ingénierie Nucléaire (DIN), deux unités de la Division de la Production Nucléaire (DPN), ainsi que les unités d'ingénierie locales des dix-neuf centrales sont concernées à divers titres par la conception de modifications. Cela représente une ressource totale de près de 5 000 personnes, avec une grande majorité d'ingénieurs.

## La démarche d'analyse des effets socio-organisationnels et humains des modifications

Depuis 2005, EDF développe et déploie dans ses unités d'ingénierie une démarche pour supporter la prise en compte des facteurs organisationnels et humains dans la conception des modifications : « la démarche SOH » permet ainsi de considérer les effets socio-organisationnels et humains d'une modification dès la « phase d'instruction stratégique » (voir figure 1).

### *Enjeux, objectifs et motivations*

L'enjeu pour EDF est d'assurer les performances escomptées d'une évolution du parc nucléaire existant par une prise en compte correcte des situations de travail susceptibles d'être affectées par cette évolution. Pratiquement, il s'agit de développer des dispositifs faciles à exploiter afin de réduire les possibilités d'erreurs humaines et de permettre l'obtention des résultats attendus.

A ce titre, le déploiement de la « démarche SOH » vise à transformer les pratiques d'ingénierie pour mieux tenir compte des organisations et des personnes dans les évolutions des installations, dès le début des projets de modifications.

## Processus, outils et dispositions organisationnelles

La « démarche SOH » comprend :

- un processus qui précise les actions à mener pour prendre en compte les Facteurs Organisationnels et Humains (FOH) aux différentes étapes de la conception des modifications (voir figure 2) ;
- des guides méthodologiques et des trames d'analyse en support aux actions mentionnées dans le processus, concernant notamment l'analyse de sensibilité SOH, la conception d'un questionnaire, la mise en œuvre d'un groupe de travail, l'animation d'une rencontre SOH, l'établissement du plan d'accompagnement d'une évolution dans une centrale ;
- des formations d'une à deux journées pour les managers, les chefs de projet et les chargés d'affaires.

Cette démarche a été complétée par une politique industrielle cadrant le recours à la sous-traitance de compétences spécialisées dans le domaine des FOH ainsi que par des actions de communication favorisant le déploiement et la promotion de la démarche au sein des unités.

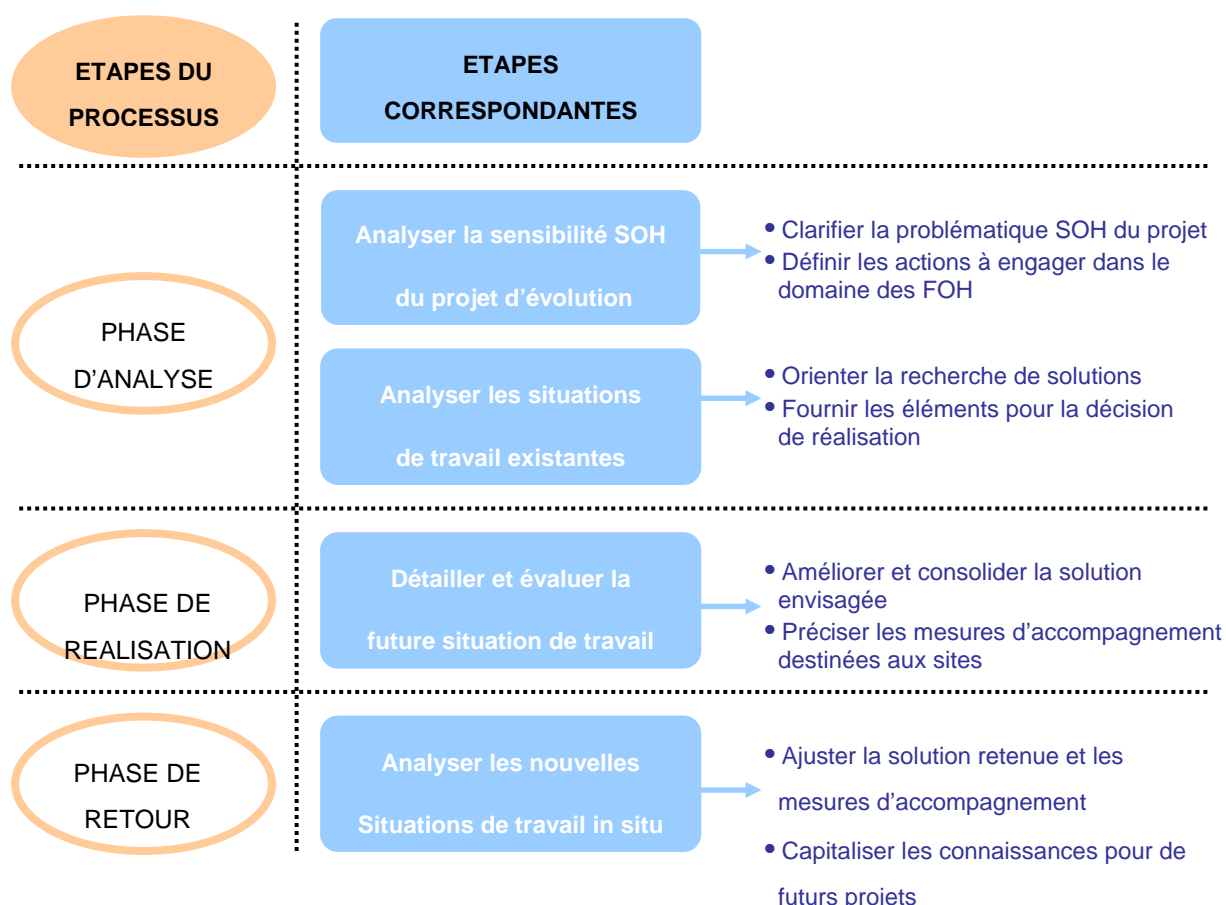


Figure 2 : Les éléments du processus préconisé par la « démarche SOH »

## L'évaluation par l'IRSN du déploiement de la « démarche SOH »

L'analyse conduite par l'IRSN en 2009 avait pour objectif d'évaluer la pertinence et l'efficacité de la « démarche SOH » mise en place par EDF. L'examen des documents en support à la « démarche SOH » et aux processus de conception des modifications a été complété par des réunions techniques, ainsi que par des entretiens avec les personnels EDF impliqués : concepteurs de la démarche, animateurs du déploiement de cette démarche dans les unités, utilisateurs de la démarche pour concevoir les modifications, exploitants des centrales concernés par les modifications.

### *Les analyses de « sensibilité SOH »*

Analyser la « sensibilité SOH » d'une modification consiste à identifier et apprécier les transformations qui pourront en résulter dans les pratiques de travail et leurs conséquences éventuelles sur la santé et la sécurité, la sûreté, la disponibilité et l'environnement. La conduite d'une analyse de « sensibilité SOH » est décrite dans un guide national qui propose un questionnement sur ces transformations. Les résultats d'une telle analyse doivent, selon EDF, se traduire par :

- l'identification des points qui pourraient s'avérer sensibles et des « zones d'ombre » à investiguer,
- une évaluation du niveau de « sensibilité SOH » de l'évolution envisagée qui permet de définir les exigences minimales à respecter en termes d'échanges avec les centrales, de traçabilité et de prise en compte des analyses SOH,
- un premier plan d'actions SOH articulé au plan d'actions du projet.

Du point de vue de l'IRSN, la trame de questionnement du guide national est pertinente dans ses principes. Cependant, l'examen par l'IRSN de quelques analyses de « sensibilité SOH » a révélé une grande hétérogénéité des pratiques et des résultats qu'elles produisent.

L'hétérogénéité des pratiques s'explique par les difficultés classiques liées à l'appropriation de tout changement organisationnel. A partir du guide national et de la trame de questionnement proposée, les unités d'ingénierie ont élaboré des outils opérationnels d'application adaptés à leurs contextes d'intervention, à leurs contraintes d'organisation propres, à la nature et au volume des projets de modification qu'elles traitent.

L'hétérogénéité des résultats des analyses de « sensibilité SOH » témoigne aussi de certaines difficultés : des analyses sont menées alors que la solution technique est déjà définie, le retour d'expérience d'exploitation est insuffisamment utilisé, les plans d'actions résultant de l'analyse SOH sont incomplets ou inexistantes. Pour l'IRSN, ces difficultés témoignent d'une assimilation insuffisante des fondements de l'analyse de « sensibilité SOH » par les unités d'ingénierie.

Cette hétérogénéité dans les pratiques et les résultats a conduit l'IRSN à examiner le niveau de guidage nécessaire pour cadrer les pratiques d'analyse de « sensibilité SOH ». Ainsi, l'amélioration de l'efficacité de la « démarche SOH » devrait passer par la recherche d'un compromis entre le besoin d'appropriation de la démarche par les unités et la nécessité d'un guidage fort sur les principes fondamentaux de la démarche.

### *L'implication des personnels d'exploitation dans la conception des modifications*

La prise en compte des besoins et des contraintes d'exploitation lors de la conception des modifications est le point clé de la « démarche SOH ». Elle suppose évidemment un rapprochement entre les utilisateurs et les concepteurs, l'implication effective des équipes d'exploitation dans la « démarche SOH » étant un facteur incontournable d'efficacité ; l'évaluation menée par l'IRSN montre que les personnels d'exploitation considèrent que la « démarche SOH » favorise ce rapprochement. Cependant, elle a également mis en évidence que les personnels d'exploitation ne disposaient pas d'une visibilité suffisante sur les processus de conception conduits par les unités d'ingénierie. De même, l'IRSN a souligné qu'il est important qu'EDF dispose de ressources humaines suffisantes dans l'ingénierie, tant au niveau local qu'au niveau national pour une mise en œuvre pérenne de la « démarche SOH ».

### *La question des compétences spécialisées dans le domaine des Facteurs Organisationnels et Humains (FOH)*

Le déploiement de la « démarche SOH » s'accompagne d'un effort important pour former et sensibiliser la population des ingénieurs au domaine des FOH qui ne doit pas rester une affaire exclusive de spécialistes. Plusieurs moyens ont été mis en place à ce sujet par EDF : la mise à disposition de guides méthodologiques ; la mise en place de formations destinées aux ingénieurs et aux managers ; la mise en place d'appuis spécialisés dans le domaine des FOH.

Les moyens déployés apparaissent pertinents dans leur nature. Toutefois, selon l'IRSN, il subsiste de réelles difficultés de compréhension de l'approche FOH dans les unités d'ingénierie. Ces difficultés résultent parfois de représentations réductrices des FOH qui conduisent à sous-estimer la technicité des analyses FOH et le besoin de compétences spécialisées. Certains personnels des unités d'ingénierie ou des sites sont toutefois conscients du besoin de compétences spécialisées.

Pour l'IRSN, les difficultés relevées dans les analyses de « sensibilité SOH » montrent que les moyens mis en place par EDF ne sont pas, à ce jour, suffisants au regard du besoin de compétences FOH nécessaires, du fait du nombre et de la complexité des dossiers d'évolution des installations.

### **Conclusion**

L'IRSN a constaté le chemin parcouru par EDF depuis plusieurs années dans le domaine de l'intégration des facteurs humains dans les modifications techniques et documentaires des réacteurs. La « démarche SOH » qu'EDF a mise en place est maintenant décrite, outillée et fait l'objet d'un accompagnement auprès des utilisateurs ; elle est inscrite dans les processus des unités d'ingénierie, son déploiement est organisé, piloté et évalué.

L'examen par l'IRSN des analyses de « sensibilité SOH » réalisées au sein des unités d'ingénierie d'EDF a toutefois mis en évidence un certain nombre d'axes d'améliorations possibles concernant l'efficacité et la pérennisation de la démarche. Sur la base des conclusions de cette analyse, l'ASN a demandé à EDF d'agir en ce sens.

Au-delà de ces axes d'améliorations propres à la « démarche SOH », l'IRSN estime qu'une réflexion plus globale devrait être engagée sur les effets que peut avoir le grand nombre de modifications réalisées dans les centrales. A cet égard, il conviendrait qu'EDF analyse l'impact de la planification des modifications. EDF pourrait tirer bénéfice d'un lissage dans le temps des évolutions des installations nucléaires ainsi que de la poursuite de la réflexion sur l'organisation de l'ingénierie engagée en 2006.



# Définitions et abréviations

1300 MWe : Réacteur nucléaire français de 1300 MWe

900 MWe : Réacteur nucléaire français de 900 MWe

ASN : Autorité de sûreté nucléaire

BAN : Bâtiment des auxiliaires nucléaires

Becquerel : (Bq) Unité de mesure, légale et internationale, utilisée pour la radioactivité. Un Becquerel correspond à une désintégration par seconde.

Bore : Le bore est un élément chimique de symbole B, son numéro atomique est 5. Il a la propriété d'absorber les neutrons et est utilisé de ce fait pour le contrôle de la réaction en chaîne.

ASG : Système d'alimentation de secours en eau des générateurs de vapeur. Ce système a pour rôle l'alimentation en eau des générateurs de vapeur (GV) toutes les fois où elle est impossible à réaliser par le poste d'eau. C'est un circuit de sauvegarde qui, lors d'accidents ou d'incidents entraînant l'indisponibilité de l'alimentation normale des GV, assure l'alimentation en eau de ceux-ci, permettant ainsi l'évacuation de la puissance résiduelle.

DVH : Système de ventilation du local des pompes d'injection de sécurité à haute pression

DVN : Système de ventilation du bâtiment des auxiliaires nucléaires

EAS : Système (de sauvegarde) d'aspersion dans le bâtiment abritant le réacteur

[INES](#) : International Nuclear Event Scale, échelle internationale des événements nucléaires donnant une appréciation de la gravité d'un événement nucléaire

MWe : Le mégawatt électrique est l'unité de la puissance fournie au réseau électrique par une centrale nucléaire

RCV : Système de contrôle chimique et volumétrique du circuit primaire

Réaction en chaîne : Dans le domaine du nucléaire, une réaction en chaîne se produit lorsqu'un neutron cause la fission d'un atome fissile en produisant plusieurs neutrons qui à leur tour produisent d'autres fissions

REP : Réacteur à eau sous pression

Réservoir PTR : Réservoir d'eau borée de grande capacité qui alimente les circuits d'injection de sécurité (RIS) et d'aspersion dans l'enceinte (EAS)

RIS : Système d'injection de sécurité d'eau borée dans le cœur

RRI : Système de réfrigération intermédiaire

Salle des machines : bâtiment abritant le turbo-alternateur qui produit l'électricité

Sievert : Unité légale de dose efficace qui permet de rendre compte de l'effet biologique produit par une dose absorbée donnée sur un organisme vivant. L'équivalent de dose n'est pas une quantité physique mesurable ; elle est obtenue par le calcul. Elle dépend de l'énergie transmise aux tissus, du type de rayonnement et du tissu atteint

SEC : Système d'alimentation en eau brute secouru (assure le refroidissement de l'eau du système RRI)

Taux de combustion : rapport exprimant le nombre de noyaux fissiles ayant connu une fission sur le nombre initial de ces noyaux

TEG : Système de traitement des effluents gazeux qui recueille les effluents gazeux du circuit primaire générés par l'exploitation du réacteur

VD3 : 3ème visite décennale d'un réacteur nucléaire

# Crédit photo

Page 7 : photo Noak/Le bar Floréal/IRSN

Page 23 : photo EDF

Page 39 : photo INRS

Page 45 : photo ZETEC

Page 55 : photo EDF - centrale de Chooz B

Page 60 : photo AREVA-photothèque

Pages 4, 8, 10 à 18, 20 à 22, 26, 29, 33, 34, 38, 39, 42, 50, 51, 52, 59, 62, 63, 67, 68 : illustrations IRSN