

Chapitre 10

Un point particulier : les tubes des générateurs de vapeur

Il a été indiqué au paragraphe 6.3 que la succession de trois barrières de confinement entre les produits radioactifs issus des fissions dans le combustible du cœur d'un réacteur à eau sous pression et l'environnement comportait un point singulier très important : les tubes des générateurs de vapeur ; ces derniers constituent en effet une partie de l'enveloppe du fluide primaire puisque l'eau de refroidissement du cœur y circule.

La troisième barrière, interposée entre l'enveloppe du fluide primaire et l'environnement, n'est donc pas ici l'enceinte de confinement, mais est constituée des enveloppes des lignes du circuit secondaires, aux très larges dimensions puisqu'elles comportent les collecteurs de vapeur (sortie des générateurs de vapeur) et même, en aval, les turbines du groupe turboalternateur. On peut cependant considérer que, en cas de difficulté (fuite de tube, brèche...), le circuit secondaire est limité aux parties comprises entre les générateurs de vapeur et les vannes principales d'arrêt de la vapeur de chacune des lignes.

Les enveloppes sous pression de ces lignes secondaires sont protégées contre d'éventuelles surpressions par des soupapes qui rejettent directement le fluide dans l'atmosphère (voir la figure 10.1). Les lignes secondaires sont également dotés d'un système de contournement de la vapeur vers l'atmosphère (GCT-a), équipé de vannes réglantes ; le seuil d'ouverture de ces vannes est calé de 5 à 10 bars (selon le type de réacteurs) en dessous du seuil d'ouverture des soupapes de protection. Ce système est utile quand la turbine ou son condenseur (système GCT-c) deviennent soudainement

indisponibles; l'évacuation de l'énergie présente et de la puissance résiduelle se fait alors par relâchement de vapeur dans l'atmosphère. Il sert également au démarrage du réacteur, grâce aux vannes réglantes, quand la puissance produite est insuffisante pour alimenter la turbine. Compte tenu des volumes de vapeur rejetés à ces occasions, l'exploitant n'a pas envisagé d'effectuer les décharges correspondantes dans des capacités fermées.

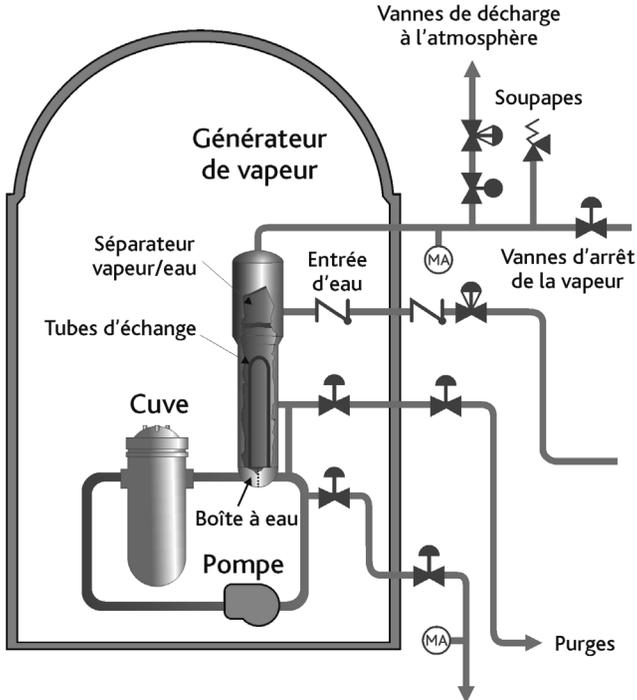


Figure 10.1. Vannes de décharge et soupapes des lignes de vapeur (MA désigne les mesures d'activité radioactive du fluide). Georges Goué/IRSN.

Les réacteurs de 900 MWe et de 1300 MWe sont équipés d'un GCT-a par générateur de vapeur. Ceux du palier N4 sont équipés de deux GCT-a par générateur de vapeur. Le réacteur EPR est équipé d'une vanne de décharge à l'atmosphère (VDA, équivalente au GCT-a) par générateur de vapeur.

Le circuit primaire étant à une pression de 155 bars dans les conditions normales de fonctionnement, il suffit qu'une brèche suffisamment importante affecte l'un des tubes des générateurs de vapeur pour que les transferts d'eau et de pression provoquent l'ouverture des vannes de décharge et des soupapes de sûreté de la ligne secondaire affectée. Il n'y a plus alors de « barrière » entre le fluide primaire et l'environnement.

Les tubes des générateurs de vapeur, dont la surface totale représente plus de 15000 m² par réacteur et dont l'épaisseur est faible, d'environ 1 mm, constituent donc

bien, à eux seuls, les deuxième et troisième barrières de confinement au sens où elles sont généralement décrites. De fait, il n'y a ici que deux barrières de confinement.

La rupture d'un tube de générateur de vapeur (désignée par l'acronyme RTGV) a été prise en compte lors de la conception des réacteurs à eau sous pression français, et la liste des conditions de fonctionnement des premières tranches plaçait cet accident en quatrième catégorie, soit avec une fréquence estimée de la rupture inférieure ou égale à 10^{-4} par an et par réacteur.

Toutefois, l'expérience mondiale a montré l'existence de dégradations et d'incidents qui ne confortaient pas ce classement. De nombreuses causes de dégradations de tubes de générateurs de vapeur ont en effet été identifiées en plus de quarante années d'exploitation: fissuration due à un phénomène de corrosion sous contrainte, instabilité vibratoire, présence de corps migrants, contraintes résiduelles de fabrication... Le tableau 10.1 présente les principales ruptures ou fuites importantes de tubes de générateurs de vapeur observées dans des réacteurs à eau sous pression d'un type proche de celui des réacteurs français³⁸⁰. Toutes ces fuites ou ruptures n'ont conduit qu'à des conséquences extrêmement limitées dans l'environnement des centrales concernées.

En 1993 (date de l'incident de Palo Verde 2), ce type de réacteurs cumulait une expérience d'environ 2 500 années de fonctionnement dans le monde. La fréquence constatée de fuite importante était donc d'environ $4 \cdot 10^{-3}$ par tranche et par an, nettement plus élevée que la fréquence maximale retenue pour les événements initiateurs des conditions de fonctionnement de quatrième catégorie.

Le reclassement en troisième catégorie de conditions de fonctionnement de l'accident de rupture d'un tube de générateur de vapeur est une modification qui a été introduite dans la liste des conditions de fonctionnement retenue pour la conception des réacteurs du palier standard de 1 450 MWe (N4). Un tel reclassement n'est pas sans conséquences pour l'exploitant: plus un accident est considéré comme probable, plus les conséquences radiologiques tolérables doivent être limitées, ce qui peut impliquer des contraintes d'exploitation plus strictes et des évolutions technologiques des tranches.

Tableau 10.1. Principales fuites et ruptures de tube de générateurs de vapeur.

Pays	Réacteur	Puissance	Date de l'événement	Débit maximal de fuite en m ³ /h
États-Unis	Point Beach 1	500 MWe	26/02/1975	30
États-Unis	Surry 2	800 MWe	15/09/1976	75
Belgique	Doel 2	400 MWe	25/07/1979	35

380. Peut également être mentionnée, bien que d'un débit significativement plus faible (10 L/h), la fuite qui a affecté à la fin de l'année 2012 un tube d'un générateur de vapeur du réacteur San Onofre 3 aux États-Unis (réacteur de 1 180 MWe). Elle a mis en évidence des difficultés de réalisation des générateurs de vapeur qui ont *in fine* conduit à la mise à l'arrêt définitif de ce réacteur.

Pays	Réacteur	Puissance	Date de l'événement	Débit maximal de fuite en m ³ /h
États-Unis	Prairie Island 1	500 MWe	02/10/1979	90
États-Unis	Ginna 1	500 MWe	25/01/1982	175
États-Unis	North Anna 1	940 MWe	15/07/1987	145
États-Unis	North Anna 1	940 MWe	25/02/1989	15
États-Unis	Mac Guire 1	1 200 MWe	07/03/1989	120
Japon	Mihama 2	470 MWe	09/02/1991	155
États-Unis	Palo Verde 2	1 300 MWe	14/03/1993	80
Belgique	Tihange 3	1 054 MWe	02/07/1996	40
États-Unis	Indian Point 2	1 000 MWe	15/02/2000	34
Corée du sud	Ulchin 4	1 000 MWe	05/04/2002	30

De plus, le Service central de sûreté des installations nucléaires (SCSIN) a considéré qu'il était nécessaire de maintenir en quatrième catégorie de conditions de fonctionnement un accident enveloppe de RTGV en supposant la sollicitation puis le blocage en position ouverte d'une soupape du générateur de vapeur concerné³⁸¹. Électricité de France a pris en compte cette demande pour les réacteurs de 900 MWe et de 1 300 MWe. Pour les réacteurs du palier N4 et pour le réacteur EPR, de conceptions plus récentes, compte tenu du doublement du GCT-a pour les réacteurs du palier N4 et de la conception de l'injection de sécurité et de l'ASG du réacteur EPR³⁸², la rupture de deux tubes d'un générateur de vapeur a été retenue comme événement initiateur d'un accident de quatrième catégorie.

Bien qu'il n'ait pas été observé de fuite importante et de rupture de tube de générateur de vapeur sur le parc français de centrales électronucléaires, les défauts constatés sur ces tubes et l'impossibilité d'éliminer totalement le risque de corps migrants ne permettent pas de retenir, *a priori*, une situation plus favorable que celle du retour d'expérience mondial.

L'étude des scénarios de RTGV est présentée dans les paragraphes suivants. Elle vise notamment à montrer que la mise en œuvre d'une conduite appropriée permet l'annulation de la fuite (équilibre des pressions primaire et secondaire), dans le but de réduire autant que possible les rejets dans l'atmosphère.

381. Dans les années 1990, des essais avaient notamment montré le caractère sensible de ce type de soupapes à l'état du fluide qui les traverse (vapeur ou eau). Ils avaient mis en évidence les limites d'emploi de celles-ci qui, de par leur conception, ne présentaient un fonctionnement stable qu'au passage d'un fluide proche de la saturation.

382. Le GCT-a étant doublé dans les réacteurs du palier N4, il y a toujours un GCT-a qui est supposé fonctionner en cas de RTGV, ce qui prévient le risque de sollicitation des soupapes de sûreté du circuit secondaire. Dans le cas du réacteur EPR, la conception des systèmes empêche de remplir d'eau le générateur de vapeur affecté et de solliciter les soupapes du circuit secondaire; en particulier, pour la conception du système d'injection de sécurité, une pression de refoulement plus faible que celle d'ouverture des soupapes du circuit secondaire a été retenue (voir le paragraphe 10.3.2).

10.1. Rupture d'un tube de générateur de vapeur étudiée en tant que condition de fonctionnement de troisième catégorie

Il est intéressant de décrire brièvement le déroulement des événements intervenant en cas de rupture complète³⁸³ d'un tube de générateur de vapeur, si les opérateurs laissent l'installation évoluer sous la seule influence des automatismes. Cette description relative à une tranche de 900 MWe a un caractère conservatif dans la mesure où ces réacteurs sont de conception ancienne et moins robuste à ce type d'accident en comparaison des paliers les plus récents.

► Phase avant l'intervention humaine

À l'instant initial, le réacteur est supposé en fonctionnement à 100 % de sa puissance nominale. Compte tenu de l'écart de pression entre le circuit primaire et le circuit secondaire, la rupture complète d'un tube de générateur de vapeur provoque le transfert de 45 kg d'eau primaire par seconde vers le circuit secondaire au début du transitoire.

Cette eau est plus ou moins contaminée par des produits radioactifs résultant des fissions, relâchés dans l'eau du circuit primaire par les défauts d'étanchéité des gaines du combustible (outre l'azote 16 produit par l'effet du rayonnement neutronique sur l'oxygène contenu dans l'eau).

Dans le circuit primaire, la pression baisse et entraîne d'abord l'arrêt automatique du réacteur et le déclenchement de la turbine sur un signal de basse pression dans le circuit primaire, à 130 bars. Dans un deuxième temps, le passage en dessous de 120 bars conduit à la mise en service automatique de l'injection de sécurité et le démarrage de l'ASG.

En parallèle, la pression dans tous les générateurs de vapeur augmente rapidement jusqu'aux environs de 71 bars, pression minimale d'ouverture des vannes de décharge à l'atmosphère. La pression est alors stabilisée en déchargeant de la vapeur dans l'atmosphère.

Le débit d'injection de sécurité et le débit d'eau sortant par la brèche s'équilibrent naturellement pour atteindre un « point de fonctionnement » où l'injection d'eau de sécurité compense l'eau perdue par la brèche. Ce débit d'eau est alors d'environ 25 kg par seconde (90 m³/h).

En moins d'une demi-heure, le générateur de vapeur, puis sa ligne de vapeur, se remplissent d'eau. Les vannes de décharge à l'atmosphère relâchent de l'eau liquide et non plus de la vapeur, ce qui accroît les conséquences radiologiques dans l'environnement du fait de la plus grande rétention de produits radioactifs dans l'eau liquide.

383. Il s'agit d'une rupture guillotine de tube, doublement débattue.

Les assemblages combustibles étant correctement refroidis pendant cette phase (le cœur restant noyé), il n'y a pas de rupture de gaine et l'eau du circuit primaire rejetée progressivement dans l'environnement reste au taux de contamination initial de l'eau du circuit primaire, avant l'accident.

Si la situation se prolongeait sans intervention humaine, la totalité de l'eau du réservoir utilisé pour l'injection de sécurité serait transférée dans le circuit primaire, puis dans le circuit secondaire, puis dans l'environnement. En effet, contrairement au cas d'une brèche du circuit primaire, l'eau perdue par la brèche ne va pas dans les puisards de l'enclaustré de confinement et ne peut donc pas être réinjectée dans le circuit primaire.

À terme, en l'absence d'appoint d'eau dans le circuit primaire, les assemblages combustibles seraient dénoyés au bout d'une vingtaine d'heures, provoquant la rupture des gaines des crayons combustibles et le transfert des produits de fission volatils dans l'environnement, situation aux conséquences évidemment beaucoup plus graves.

► Conduite par les opérateurs

Pour éviter une telle situation, il est nécessaire que les opérateurs interviennent pour isoler le générateur de vapeur affecté (avec l'arrêt de l'ASG de ce générateur de vapeur) et diminuer la pression dans le circuit primaire en commençant par arrêter l'injection de sécurité (qui maintenait la pression dans le circuit primaire en équilibre avec la brèche). En effet, dès que l'ASG est isolée et que la pression dans le circuit primaire devient égale ou inférieure à celle correspondant à l'ouverture de la vanne de décharge du GCT-a du générateur de vapeur affecté, celle-ci peut se refermer et il n'y a alors plus de transfert d'eau, ni de relâchement de produits radioactifs dans l'atmosphère.

Les procédures de conduite incidentelle et accidentelle ont été mises au point pour optimiser le traitement par les opérateurs de l'accident de RTGV. Elles sont disponibles en salle de commande et les opérateurs sont particulièrement formés à la conduite lors de cet accident. Pour le scénario de RTGV présenté, l'opérateur « entre » en procédures de conduite incidentelle-accidentelle à la suite de l'arrêt automatique du réacteur. Le premier document parcouru par l'opérateur est le document d'orientation et de stabilisation (DOS) dont l'objectif est de réaliser un diagnostic de l'état du réacteur et d'orienter vers la stratégie adaptée. En cas de RTGV, la détection d'activité radiologique dans un générateur de vapeur oriente vers la procédure dite ECP3, qui permet le traitement de ce type d'accidents (voir à cet égard les éléments présentés au chapitre 33 sur l'approche par états).

La conduite prescrite dans la procédure ECP3 vise à limiter les transferts d'eau du circuit primaire vers le circuit secondaire, notamment par l'arrêt de l'injection de sécurité, suivi d'une baisse suffisamment rapide de la pression dans le circuit primaire jusqu'à la pression dans le générateur de vapeur accidenté. La conduite prescrite conduit également à limiter la montée du niveau de l'eau dans le générateur de vapeur affecté grâce au système de purges (APG). L'objectif premier de la conduite est d'éviter toute ouverture de soupape qui conduirait à des rejets d'eau

liquide directement dans l'environnement. En effet, le taux de refus de refermeture d'une soupape devient élevé quand une soupape conçue pour relâcher de la vapeur est sollicitée par de l'eau liquide.

10.2. Prévention d'un accident de RTGV, risques de ruptures multiples

Même si aucune rupture ou fuite importante de tube de générateur de vapeur ne s'est produite en France sur les tranches du parc électronucléaire, on comprend que, pour éviter ce type d'accident, le programme de contrôles non destructifs périodiques des tubes présente une importance particulière, même s'il est susceptible de prolonger la durée des arrêts de tranche et participe à la radio-exposition des personnels. Les défauts observés dans les tubes conduisent, dans certains cas, à les boucher préventivement. Les différents types de défauts observés en France sont présentés au chapitre 26.

Il est à noter que le risque de voir s'étendre la rupture d'un tube à un ou plusieurs autres tubes voisins, eux-mêmes déjà affaiblis, ne doit pas être négligé. Des études paramétriques ont été menées pour apprécier le comportement de l'installation en cas de ruptures multiples en nombres croissants et en tenant compte de diverses défaillances complémentaires. Au-delà de la rupture de 5 à 10 tubes, la cinétique d'ensemble se modifie peu car la vitesse des transferts d'eau est limitée par la relation entre le débit de l'injection de sécurité et la capacité des organes de décharge des lignes secondaires, ce qui maintient l'ensemble du système à la pression d'ouverture des vannes de décharge dans l'atmosphère (71 bars pour les réacteurs de 900 MWe). En cas de ruptures multiples de tubes d'un générateur de vapeur, la conduite reste la même, l'objectif étant d'équilibrer les pressions entre le circuit primaire et le générateur de vapeur accidenté.

Pour diminuer le risque de rupture de tubes de générateur de vapeur (et aussi éviter une perte de rendement trop importante par le bouchage de plus de 15% des tubes d'un générateur de vapeur), il est possible de changer totalement les générateurs de vapeur d'une tranche (voir la figure 10.2).

En 1990, pour la première fois sur un réacteur français, les trois générateurs de vapeur de la tranche 1 de la centrale nucléaire de Dampierre-en-Burly ont été changés. Cette première expérience sur un réacteur français a également permis de mieux programmer la même opération sur d'autres tranches; en 2019, 28 des 34 tranches de 900 MWe ont vu leurs générateurs de vapeur remplacés et les opérations de remplacement de générateurs de vapeur des tranches de 1300 MWe ont commencé en 2017³⁸⁴.

384. Il est à noter qu'il ne s'agit pas de remplacements à l'identique (changement de matériaux...).

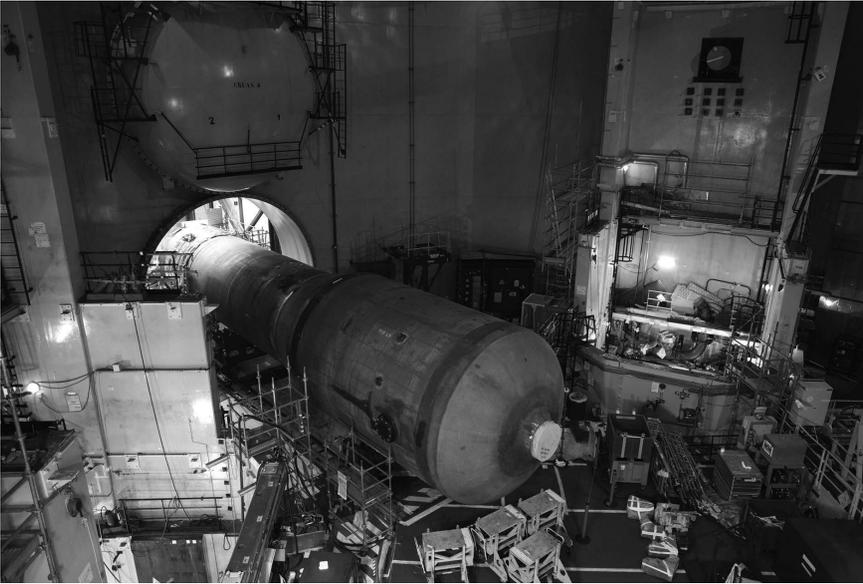


Figure 10.2. Remplacement d'un générateur de vapeur: passage d'un générateur de vapeur par le tampon d'accès des matériels (TAM). Jean-Marie Huron/Signatures/Médiathèque IRSN.

Par ailleurs, la prévention passe également par la détection des éventuelles fuites des tubes des générateurs de vapeur, même très faibles. Les systèmes de détection ont été améliorés pour permettre un diagnostic précoce par les opérateurs et limiter ainsi les évolutions possibles de ces fuites. Il s'agit, en particulier, de l'utilisation, lorsque le flux nucléaire est suffisamment important, de la détection de l'azote 16, élément de période radioactive très courte (de l'ordre de 7 secondes), qui est produit dans l'eau du circuit primaire lors de son passage dans le cœur par capture d'un neutron par l'oxygène 16 et émission d'un proton. Toute détection d'azote 16 dans l'eau du circuit secondaire est donc l'indice d'une fuite du circuit primaire vers le circuit secondaire. Grâce à l'énergie élevée du rayonnement γ caractéristique de la désintégration de l'azote 16 (10,4 MeV), la détection peut se faire en continu à travers les tuyauteries du circuit secondaire. L'activité détectée est exprimée directement en litres par heure sur les indicateurs en salle de commande. En cas de détection d'un débit de fuite, les opérateurs se réfèrent à la règle de fonctionnement dite à faible fuite (« R3F »); celle-ci ne permet de continuer l'exploitation de la tranche que pour de très faibles fuites, à la condition de mettre en place des contraintes d'exploitation proportionnées au débit de fuite et de prendre des mesures de surveillance renforcée si le débit dépasse un seuil ou évolue dans le temps. Pour des fuites plus importantes, le repli de la tranche est demandé dans des délais dépendant du débit de fuite; les opérateurs peuvent être directement orientés vers les procédures de conduite incidentelle ou accidentelle.

En 2006, l'application de la « R3F » au réacteur n° 4 de la centrale nucléaire de Cruas a permis de détecter rapidement une fuite (d'environ 0,5 m³/h) et le réacteur a pu être arrêté par les opérateurs, sans aucun rejet significatif.

10.3. Rupture de tube(s) d'un générateur de vapeur étudiée en tant que condition de fonctionnement de quatrième catégorie

10.3.1. Réacteurs de 900 MWe et de 1 300 MWe

Les réacteurs de 900 MWe et de 1 300 MWe ne sont équipés que d'une seule ligne GTC-a par générateur de vapeur. Une éventuelle défaillance du système de décharge dans l'atmosphère (défaut d'ouverture à la sollicitation) entraînerait l'ouverture des soupapes, tarées à une pression plus élevée (d'environ 5 à 10 bars). En cas de RTGV, cette ouverture est redoutée, car le bon fonctionnement en eau liquide des soupapes n'est pas assuré (risque de non-refermeture). Un blocage en position ouverte d'une telle soupape, comme cela s'est produit en 1982 à la centrale nucléaire de Ginna aux États-Unis, conduirait à aggraver la situation car les opérateurs auraient à gérer une rupture de tube de générateur de vapeur avec une fuite non isolable de l'eau du circuit primaire dans l'atmosphère.

Comme cela a été indiqué plus haut, cette situation est prise en compte, pour les réacteurs de 900 MWe et de 1 300 MWe, comme condition de fonctionnement de quatrième catégorie. La seule parade dans cette situation est de dépressuriser les circuits primaire et secondaire jusqu'à 1 bar afin d'annuler le débit de transfert d'eau du circuit primaire vers le circuit secondaire d'une part, le débit de transfert du circuit secondaire vers l'atmosphère d'autre part.

10.3.2. Réacteurs de 1 450 MWe et EPR (Flamanville 3)

Les réacteurs de 1 450 MWe (palier N4) sont équipés de deux lignes GCT-a en parallèle pour chaque générateur de vapeur. Cette conception rend ces réacteurs robustes à une défaillance unique d'une vanne de GCT-a. Dans ces conditions, même en cas de blocage en position fermée d'une vanne de GCT-a, l'autre vanne permet d'écrêter la pression du générateur de vapeur affecté par une RTGV. Ainsi, les soupapes de ce générateur de vapeur ne sont pas sollicitées et ne risquent pas de rester bloquées en position ouverte. L'hypothèse du blocage d'une soupape en position ouverte étant ainsi exclue, la condition de fonctionnement de quatrième catégorie retenue pour le palier des réacteurs de 1 450 MWe est la rupture franche de deux tubes de générateur de vapeur, hypothèse qui entraîne un remplissage plus rapide du générateur de vapeur affecté et donc un risque de rejets plus importants que pour la condition de fonctionnement de troisième catégorie dans laquelle un seul tube est supposé rompu.

Le réacteur EPR a été conçu pour être particulièrement robuste à l'égard d'un accident de RTGV. L'objectif retenu lors de la phase de conception a été que la RTGV ne conduise à aucun rejet liquide. L'atteinte de cet objectif a été rendue possible en annulant les sources participant au remplissage du générateur de vapeur affecté par la brèche et à la montée en pression de celui-ci, à savoir l'alimentation de secours en eau des générateurs de vapeur et la brèche elle-même, par les dispositions suivantes :

- une pression maximale de refoulement de l'injection de sécurité inférieure à celle de la valeur de consigne d'ouverture des vannes de décharge à l'atmosphère (VDA) appliquée en cas de détection d'un niveau d'eau élevé dans un générateur de vapeur, et à celle de la valeur d'ouverture des soupapes du circuit secondaire,
- le non-démarrage de l'ASG en cas d'inventaire en eau suffisant dans un générateur de vapeur, ce qui conduit à limiter la montée du niveau d'eau dans le générateur de vapeur affecté.

De plus, le réacteur EPR a été conçu de façon à gérer de manière automatique l'accident de RTGV jusqu'à l'équilibre des pressions primaire et secondaire, notamment par la mise en place de deux automatismes :

- un refroidissement partiel automatique permettant la dépressurisation du circuit primaire pour rejoindre la plage de refoulement des pompes d'injection de sécurité à moyenne pression (ISMP),
- un isolement automatique du générateur de vapeur affecté permettant de le maintenir isolé à une pression supérieure à la pression maximale de refoulement de l'ISMP.

Pour le réacteur EPR, il n'existe qu'une ligne de décharge dans l'atmosphère (VDA) par générateur de vapeur. Toutefois, la sollicitation d'une soupape étant exclue, la condition de fonctionnement de quatrième catégorie est la rupture franche de deux tubes de générateur de vapeur, comme pour les réacteurs de 1 450 MWe.

Les résultats des études de RTGV de quatrième catégorie montrent que les rejets liquides dans l'environnement sont beaucoup plus faibles pour les réacteurs du palier N4 que pour les réacteurs de 900 MWe et de 1 300 MWe (avec sollicitation d'une soupape de sûreté); ceux du réacteur EPR sont nuls.

Cependant, si l'abaissement de la pression de refoulement du système d'injection de sécurité dans le cas du réacteur EPR permet bien de réduire les rejets d'un accident de RTGV, il n'est pas sans conséquences pour d'autres types d'accidents comme ceux de perte de réfrigérant primaire (APRP). En effet, plus la pression maximale de refoulement de l'injection de sécurité est faible, plus la compensation de la perte d'eau par la brèche intervient tardivement, ce qui augmente le risque de dénoyage du cœur. Une optimisation est donc recherchée.

10.4. Dispositions visant à limiter les conséquences radiologiques des accidents de RTGV

Les conséquences radiologiques d'un accident de RTGV dépendent de deux paramètres: la quantité de fluide (radioactif) relâché dans l'environnement et l'activité radiologique initiale de l'eau du circuit primaire.

Concernant les rejets dans l'environnement, l'intervention humaine est capitale (réacteurs de 900 MWe, 1 300 MWe et 1 450 MWe) pour ce type d'accident qui nécessite de dépressuriser rapidement le circuit primaire à l'aide des générateurs de vapeur sains, afin d'atteindre dans un premier temps les critères autorisant l'arrêt de l'injection de sécurité (qui participe elle-même à maintenir le circuit primaire en pression). Dans un second temps, les opérateurs doivent annuler la différence de pression entre les circuits primaire et secondaire pour annuler le débit de fuite. Aussi, le personnel de conduite reçoit une formation particulière sur la conduite dans le cas d'un tel accident, avec des recyclages fréquents, de façon à limiter les risques de rejets extérieurs significatifs. Mais, au-delà de cet aspect humain, c'est le blocage éventuel en position ouverte des soupapes de sûreté du circuit secondaire qui est l'élément décisif pour l'évolution du scénario et de ses conséquences.

Pour limiter les conséquences dans l'environnement, il convient que les rejets se fassent par les organes de décharge dans l'atmosphère, qui sont qualifiés pour fonctionner en eau liquide et qui sont isolables par une deuxième vanne en cas de défaillance de la vanne principale, et non par les soupapes de sûreté qui ne sont pas qualifiées en eau et ne sont pas isolables. Une autre solution consiste à chercher à éviter le débordement en eau³⁸⁵ du générateur de vapeur affecté en annulant le plus rapidement possible les sources de remplissage (point développé ci-après).

► Plans d'actions « RTGV4 » mis en œuvre par Électricité de France pour les réacteurs de 1 300 MWe

Dans le cadre de son programme de travail associé aux troisièmes visites décennales (VD3) des réacteurs de 1 300 MWe, Électricité de France a adopté un plan d'actions visant à réduire l'impact sur l'homme et sur l'environnement de l'accident de rupture de tube de générateur de vapeur de la quatrième catégorie de conditions de fonctionnement (« RTGV 4 »). Cet accident est en effet celui qui peut conduire aux conséquences radiologiques les plus élevées parmi les accidents sans fusion du cœur. Les actions visant à éviter le remplissage complet en eau du générateur de vapeur affecté comportent :

- une modification matérielle: il s'agit de l'isolement automatique du système d'alimentation de secours (ASG) du générateur de vapeur affecté en cas d'atteinte du seuil de niveau d'eau très haut dans le générateur de vapeur (THNGV), ce qui nécessite d'élaborer un signal THNGV spécifique pour chaque générateur de vapeur;
- une évolution de conduite: il s'agit du prolongement du refroidissement rapide du circuit primaire pour atteindre plus rapidement le critère d'arrêt de l'injection de sécurité à moyenne pression (ISMP) en abaissant, d'environ 25 bars, le seuil de pression de refermeture des vannes de contournement de la turbine vers l'atmosphère (GCT-a). Plus l'arrêt de l'ISMP est précoce, plus tôt les opérateurs

385. Il s'agit du remplissage du générateur de vapeur qui a pour conséquence des rejets en eau par les soupapes.

pourront commencer à dépressuriser le circuit primaire et ainsi diminuer la différence de pression entre ce dernier et le générateur de vapeur affecté avec au final une quasi annulation du débit d'eau sortant par la brèche.

Ces actions sont suffisamment efficaces pour empêcher le générateur de vapeur affecté de déborder³⁸⁶ lorsque le réacteur est initialement à basse puissance. Pour prendre en compte le cas d'un état initial à pleine puissance, Électricité de France a complété son plan par une autre modification matérielle, à savoir l'isolement complet et automatique du système d'alimentation (régulée) normale en eau des générateurs de vapeur (ARE) en cas de manque de tension externe (MDTE). Cette modification concourt à limiter le remplissage du générateur de vapeur affecté en cas de RTGV à pleine puissance.

D'après les simulations d'Électricité de France, ces modifications permettent de diminuer les rejets liquides dans l'atmosphère, calculés, par un facteur 16.

Quant aux réacteurs de 900 MWe, Électricité de France a commencé, à partir des troisièmes visites décennales de ces réacteurs, à apporter des évolutions matérielles comme l'isolement automatique du système ASG et l'arrêt automatique du système ARE afin de ralentir le remplissage du générateur de vapeur affecté. Cependant, ces modifications ne répondant pas aux exigences permettant de les qualifier en situation accidentelle, elles ne peuvent pas être utilisées dans les études de sûreté. Ainsi, des dispositions visant à diminuer significativement les rejets dans l'environnement restent attendues de la part d'Électricité de France pour les réacteurs de 900 MWe, dans le cadre de la réévaluation de sûreté associée à leurs quatrièmes visites décennales.

Pour les réacteurs de 1450 MWe, une modification de la conduite similaire à celle qui a été adoptée pour les réacteurs de 1300 MWe a été retenue; cela permet de diviser par un facteur 2 les rejets d'eau en cas de RTGV.

► Ajustement des spécifications radiochimiques du réfrigérant primaire

Un autre moyen de limiter les conséquences radiologiques d'un accident de RTGV est l'abaissement des seuils des spécifications radiochimiques de l'eau du circuit primaire, ou, en d'autres termes, l'activité maximale autorisée dans le circuit primaire. En effet, l'ampleur des conséquences radiologiques d'un accident de RTGV est liée non seulement à l'ampleur des rejets (essentiellement en phase liquide, les produits de fission présents dans cette phase étant supposés entièrement relâchés dans l'atmosphère), mais également au degré de contamination du circuit primaire (qui contamine le circuit secondaire *via* la brèche dans le tube de générateur de vapeur) par les produits de fission et les produits de corrosion. Ainsi, dès lors que la RTGV a été prise en compte comme une condition de fonctionnement de troisième catégorie, les seuils des spécifications radiochimiques ont été revus de manière drastique en 1987

386. Il s'agit là encore du remplissage en eau du générateur de vapeur affecté qui fait qu'en cas de blocage du GCT-a les soupapes sont sollicitées en eau.

(notamment le seuil d'arrêt du réacteur concernant l'équivalent en iode 131 ³⁸⁷). Les spécifications radiochimiques du fluide primaire ont ensuite fait l'objet d'évolutions successives, dans un sens plus contraignant et avec l'introduction de nouveaux indicateurs, du fait de la survenue de problèmes particuliers; les indicateurs utilisés pour la surveillance de l'activité radiologique du fluide primaire et les évolutions des seuils associés sont présentés au paragraphe 28.1.

En 2009, Électricité de France a fait part à l'Autorité de sûreté nucléaire de son objectif d'étendre la durée de fonctionnement des réacteurs en exploitation au-delà de 40 ans (voir le paragraphe 30.5). En 2010, l'Autorité de sûreté nucléaire a considéré que les études de réévaluation faites en vue de cette extension de la durée de fonctionnement des réacteurs du parc électronucléaire devraient être conduites pour réduire autant que raisonnablement possible les conséquences radiologiques des accidents et tendre vers les objectifs de sûreté applicables aux nouveaux réacteurs, tels que ceux qui ont été retenus pour le réacteur EPR ou ceux qui ont été formulés par l'association WENRA pour les nouveaux réacteurs.

D'ores et déjà, en 2018, Électricité de France a indiqué qu'il prévoyait d'abaisser le seuil d'arrêt des réacteurs de 900 MWe en équivalent d'iode 131 en transitoire de puissance (« pic d'iode ») dans l'eau du circuit primaire³⁸⁸.

387. Cet indicateur (équivalent en 131 I) permet de prendre en compte la radiotoxicité des différents isotopes de l'iode.

388. Disposition également proposée à l'ASN pour les réacteurs de 1 300 MWe.

