

Sûreté nucléaire accrue : un procédé innovant et robuste d'extraction de la puissance résiduelle d'un réacteur à eau ordinaire en cas de perte totale des moyens de refroidissement actuellement prévus. .

L'accident de Fukushima a mis en évidence que, en dépit la très faible probabilité d'occurrence de la perte de tous les moyens de refroidissement de secours prévus sur un site, il était possible qu'elle survienne et conduise à la fusion des combustibles d'un réacteur nucléaire à eau ordinaire mis à l'arrêt d'urgence.

La présente étude propose une solution robuste, si ce n'est absolue, à ce problème en réutilisant les générateurs de vapeur usagés pour extraire en toutes circonstances la puissance résiduelle.

Étude physique

L'étude qui suit peut s'appliquer à n'importe quel réacteur à enceinte de confinement.

Pour illustrer sur un cas concret le procédé, nous nous plaçons dans le cas d'un REP de 900 MW (CP1) mis à l'arrêt d'urgence, sans qu'il demeure aucun moyen de refroidissement à l'exception d'un volume limité d'eau de secours en réserve. Le dégagement thermique s'élève à 189 MW à l'instant où la réaction nucléaire s'arrête, puis à 40 MW après une heure d'arrêt, à 11 MW après une journée et à 6 MW après une semaine. Il faut donc évacuer 115 MWh la première heure, 700 MWh le premier jour et 2000 MWh la première semaine.

Sachant que la capacité thermique de l'eau est de $4,2 \text{ J.g}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et que sa chaleur latente de vaporisation à 100°C est de 44 kJ.mol^{-1} soit $2,44 \text{ kJ.g}^{-1}$, le dimensionnement de la réserve d'eau dépend de son utilisation. Il faut en effet, 84 J.g^{-1} si on veut éviter de l'échauffer de plus de 20°C ou 336 J.g^{-1} de 20°C jusqu'à l'ébullition sous 1 bar et $2,78 \text{ kJ.g}^{-1}$ si on produit de la vapeur. Pour refroidir le réacteur pendant une semaine, il faut donc $86\,000 \text{ m}^3$ d'eau en réserve si on se limite à une élévation de température de l'eau en réserve de 20°C , $21\,000 \text{ m}^3$ au minimum si l'on veut éviter de transformer cette eau en vapeur et seulement au maximum $2\,600 \text{ m}^3$ si l'on accepte de transformer cet eau en vapeur qui sera relâchée dans l'atmosphère.

Seul, le dernier cas permet d'envisager une réserve d'eau de taille raisonnable à l'intérieur de l'enceinte. En effet, si l'enceinte possède un volume libre de $45\,000 \text{ m}^3$ sur un volume total de $60\,000 \text{ m}^3$, ce volume est situé principalement en partie haute de l'enceinte, partie qui n'est pas conçue pour recevoir un poids supplémentaire de plusieurs dizaines de milliers de tonnes.

Pour refroidir le réacteur en début d'arrêt, il faut nécessairement faire passer l'eau à l'intérieur du circuit primaire, car :

- le réacteur est isolé thermiquement
- il est difficile d'évacuer de la vapeur autour du réacteur
- le réacteur est très compact, la surface d'échange est plus importante autour des crayons.

Le dégazage du primaire se fait à partir d'une soupape de sécurité en haut du pressuriseur.

La question est combien peut-on dégager de vapeur du circuit primaire sans dépressuriser l'enceinte dans l'environnement ?

Au départ, l'enceinte contient $1,9 \text{ Mmoles}$ d'air ; si l'on dépressurise à 2 bars, l'eau vapeur est à 120°C (393 K). Sachant que l'enceinte peut contenir $2,75 \text{ Mmoles}$, seules $0,85 \text{ Mmoles}$ d'eau vapeur ou 15 m^3 d'eau liquide supplémentaires peuvent être accueillies dans l'enceinte à cette pression.

Si une seule gaine est détériorée, l'eau du circuit primaire devient radioactive ; compte tenu des réglementations, il convient de tout faire pour éviter de la rejeter dans l'environnement. Un refroidissement de secours satisfaisant impliquerait donc un échange physique avec la réserve d'eau extérieure. L'enceinte du réacteur serait contaminée et rendrait le réacteur inopérant par la suite.

Une alternative pour sauver le réacteur

Nous allons montrer qu'il est possible à un coût relativement abordable de garantir le refroidissement nécessaire pour empêcher la fusion du coeur, en cas de perte des dispositifs classiques de secours en évitant toute contamination à l'extérieur du site :

- avec une quantité d'eau limitée
- sans dégagement de vapeur ou de radionucléides dans l'environnement
- en conservant les propriétés fonctionnelles du réacteur pour un usage ultérieur.

Selon l'IRSN, le premier dégazage dans l'enceinte devrait avoir lieu 20 minutes après l'arrêt du réacteur. La puissance thermique est alors de 165 MW. Comme précédemment indiqué, au bout d'une heure, elle chute à 40 MW, puis à 11 MW, un jour après la survenue de l'accident. Est-il possible de condenser la vapeur produite

par de telles puissances thermiques ? il faudrait des surfaces d'échange de l'ordre de plusieurs centaines ou de milliers de mètre carrés. Construire un condenseur pour chaque réacteur entraînerait sans doute un coût prohibitif. Pourtant de telles surfaces existent ... dans les générateurs de vapeur usagés.

Un générateur de vapeur en situation normale est utilisé pour échanger une puissance thermique de l'ordre de 300 MW par ébullition,. Il convient de savoir que les coefficients de transferts thermiques h sont généralement encore meilleurs en condensation qu'en ébullition.

L'étude précise des transferts thermiques par condensation distingue deux modèles. Dans le modèle le plus défavorable : la condensation en film, à partir d'un écart de température de 20°C, le transfert thermique limité par les phénomènes de transports et n'est plus proportionnel à la différence de température. On ne peut plus utiliser la loi de Newton, mais on a un bon ordre de grandeur à partir du transfert thermique surfacique qui est de l'ordre de

10^5 W.m^{-2} dans le cas d'une vapeur pure. Par exemple pour le condenseur d'une centrale nucléaire le transfert est de l'ordre de $4 \cdot 10^4 \text{ W.m}^{-2}$ pour une différence de température de 20°C et à 0,2 bar. Pour condenser la vapeur issue du circuit primaire, il faudrait :

1650 m² 20 minutes après l'arrêt, moins de 400 m² au bout d'une heure, moins de 100 m² les jours qui suivent.

Un générateur de vapeur possède une surface d'échange de 2000 m², si 10% des tubes sont bouchés, cette surface tomberait à 1800 m². Elle est encore nettement suffisante pour évacuer la puissance résiduelle dont nous avons parlé.

Dans les configurations étudiées plus loin, le générateur de vapeur serait refroidi par l'eau de la source froide de la centrale circulant dans les tubes du circuit primaire à des débits de 0,5 à 2 m³.s⁻¹ Ce sont des débits très supérieurs aux pompes des services d'incendie, mais tout à fait dans la gamme de performance des pompes industrielles. Il faut prévoir une pompe de relevage et un bassin intermédiaire, associée à une pompe d'injection. La puissance nécessaire pour faire circuler l'eau dans les tubes est de l'ordre du kW, celle pour tirer l'eau d'une source plus basse est de l'ordre de la dizaine de kW. Un pays industriel est capable de mobiliser de telles puissances en toutes circonstances et en n'importe quel point de son territoire.

Le générateur de vapeur en fonctionnement basse pression

Pour alimenter le générateur en vapeur pure de l'ordre de quelques bars, il faut prévoir une détente de la vapeur sortant du pressuriseur à 170 bars, 350°C. Le plus simple serait de détendre la vapeur dans une turbine qui actionnerait un système de ventilation.

On peut utiliser simplement la zone des tubes avec deux ouvertures comme un échangeur à

contre courant. Si on veut profiter de toutes les potentialités du générateur de vapeur, on propose la configuration suivante :

Le générateur de vapeur serait utilisé verticalement à l'extérieur de l'enceinte : la vapeur serait introduite au-dessus du sommet des tubes, au moyen d'une cloche, à des vitesses de l'ordre du m.s^{-1} . L'écoulement de la vapeur est alors nettement turbulent, en revanche l'écoulement du liquide, en bas est lent, sa vitesse est de l'ordre de 1 cm.s^{-1} à 1 mm.s^{-1} . Le condensat remonterait par l'enveloppe du faisceau tubulaire. Il faut prévoir une sortie du condensat moins haute que l'entrée d'eau initiale ainsi qu'un retour de gaz, pour éviter qu'en cas de surpression le système se bloque. Les incondensables seraient bloqués dans la partie haute du générateur de vapeur.

Conclusion provisoire :

Quelque soient les configurations, on remarque que le générateur usagé serait en mesure d'extraire la puissance résiduelle d'un réacteur à l'arrêt avec une puissance mécanique qui pourraient être apportées par des secours extérieurs.

Les responsables auraient une alternative à la destruction du réacteur, en effet en utilisant une quantité d'eau limitée et recyclée dont on a préalablement défini la chimie, le réacteur serait intact, ce qui ne pourrait pas être le cas, avec une réserve d'eau stockée à l'extérieur.

On peut analyser la fiabilité du système :

- le générateur a fonctionné continûment pendant des périodes de deux ans à des pressions et des températures supérieures.
- dans un pays dense comme le nôtre, il est possible d'apporter rapidement les puissances nécessaires pour fonctionner le système.
- il est possible aussi de bâtir une liaison du circuit primaire au GV en cas d'accident.
- à partir de l'expérience des réacteurs nucléaires, on peut garantir une grande fiabilité aux pompes.

Le générateur de vapeur, une barrière de confinement supplémentaire

Bien que le système précédent semble interdire toute fusion de cœur, on peut remarquer que le GV constitue une barrière de confinement supplémentaire en sus de l'enceinte de confinement. En effet, en cas d'accident grave, l'enceinte ne peut pas contenir la vapeur du primaire, et la libérerait dans l'atmosphère. Cette vapeur peut contenir jusqu'à 10^{16} becquerels de césium 137 et d'iode 131 et jusqu'à 10^{18} becquerels de xénon 133.

Dans la configuration précédente (GV vertical, arrivée de gaz entre le tourbillon et les tubes), l'étage supérieur du GV retrouve une utilité, les sécheurs permettent de condenser les gouttelettes d'aérosols, cet étage pourrait être refroidi.

Si on condense la vapeur à partir du primaire, celle-ci ayant traversé un filtre à sable et des recombineurs d'hydrogène, on obtient des volumes de gaz assez limités, autour de 600 L pour les gaz nobles et 200 kg de dihydrogène. Il serait possible de piéger ses gaz dans des ballons à l'intérieur d'un bâtiment.

Si on condense la vapeur à partir de l'enceinte du réacteur, les gaz nobles et le dihydrogène sont mélangés à $45\,000 \text{ m}^3$ d'air. Ceci a plusieurs conséquences :

- Le volume de gaz incondensable devient très grand, il faut prévoir un retour de gaz, en bas des tubes entre la cloche d'arrivée et le tourbillon.
- L'efficacité du générateur de vapeur est limitée, elle probablement divisée par un facteur 5 ; comme la fusion de cœur intervient lorsque la puissance à extraire tombe sous 10 MW, le GV est alors nettement surdimensionné, il est probable que la condensation ait toujours lieu dans de larges proportions.
- L'hydrogène est mélangé à de l'air et pour éviter d'entrer dans la zone de détonation sur le diagramme de Shapiro, il faudrait que la pression de vapeur d'eau reste assez élevée. Ce qui peut être obtenu par la baisse d'efficacité du générateur ou bien un refroidissement moins important.

-Récupérer le xénon 133 nécessiterait de mobiliser des volumes assez importants mais encore accessibles (volume de 10 ballons atmosphériques dans un bâtiment de la taille d'un gymnase) Il faudrait prévoir aussi si dans une dernière phase si le coeur fondu attaque le radier, une combustion et une dissolution des gaz produits (CO , H_2), néanmoins comme le générateur de vapeur permet un refroidissement sans lâcher de vapeur radioactive dans l'environnement, il semble difficile d'arriver à cette extrémité.

Une autre configuration : le GV dans un circuit haute pression

On s'appuie ici sur le fait qu'une hauteur de vapeur nécessite une différence de pression négligeable par rapport à une hauteur d'eau.

Dans cette configuration, on ne modifie pas le GV : la vapeur issue du pressuriseur serait introduite par le haut du GV et le condensat ressortirait par l'ancienne alimentation en eau, soit directement dans le primaire, soit dans la cuve reliée au primaire. Il suffit que le GV soit placé 10 m au-dessus du réacteur, pour permettre à l'eau issue du refroidissement d'entrer directement dans le circuit primaire.

Conclusion technique

Les générateurs de vapeur usagés permettent d'évacuer la puissance thermique résiduelle de plusieurs manières.

Aspect économique

Un générateur de vapeur usagé d'un REP 900, pèse 300 tonnes, il a donc une valeur comprise entre -750 k€ et 900 k€ suivant qu'on le considère comme un déchet TFA ou de la ferraille récupérable.

Un REP a une valeur marchande de l'ordre de 1 G€ et un coût de remplacement d'environ 3 G€ Construire un bassin en béton de 100 000 m³ revient à 1 à 2 M€, mais n'exclut pas la possibilité de rejeter des aérosols.

Pour la population le risque est présenté de la manière suivante: il y a un risque de fusion de coeur sur un réacteur en Europe. Dans ce cas, 100 km² serait contaminés, en zone peu dense, la perte d'activité et de logements pour la population s'élèverait à 300 M€, la perte du réacteur 1 G€, avec la décontamination, nous avons un ordre de grandeur de 2 G€ pour 100 réacteurs. Il est donc raisonnable de considérer qu'un GV usagé testé en condenseur a une valeur de l'ordre de 20 M€ par réacteur. Recycler les GV usagés entraîne donc une création de valeur de l'ordre du G€.

Conclusion économique :

L'utilisation des générateurs de vapeur en tant que système de refroidissement ultime en cas de perte des dispositifs de secours actuellement prévu permet de réduire la taille de la réserve d'eau de secours, de la placer à l'intérieur de l'enceinte et de contrôler sa chimie.

Le recyclage d'un GV en condenseur de secours augmente considérablement la sécurité lorsqu'on se place dans le cadre d'accident grave.

Avec la réserve d'eau de secours, il permet de dépasser la contradiction entre confinement et évacuation de la chaleur. Le plus important, est qu'il présente la possibilité d'un confinement total en cas d'accident grave. Il acquerra sa valeur symbolique lorsqu'on reliera devant des journalistes, la sortie du filtre à sable devenu inutile, au générateur de vapeur. C'est cette valeur symbolique associée à la possibilité de refroidir aisément le réacteur par des moyens de secours extérieurs qui est la plus importante pour l'image de l'industrie nucléaire.