

## Acceptation de la cuve du réacteur EPR de Flamanville

François Justin

La synthèse ci-dessous faite et illustrée à partir des documents publiés par l'IRSN\* (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, l'expert public en matière de recherche et d'expertise sur les risques nucléaires et radiologiques), a été validée par la Commission Communication de l'ARSCA.



*La cuve du réacteur EPR de Flamanville dont la construction est en cours d'achèvement a défrayé la chronique depuis plusieurs années : au terme d'un très lourd programme d'investigations et de recherche conduit par AREVA et EDF, l'Autorité de Sûreté Nucléaire a donné son accord pour la mise en service de la cuve. Cette affaire est difficile à comprendre par le non spécialiste pour deux raisons principales :*

- La nature des questions analysées est difficile : métallurgie de pièces en acier très spécial, de très grande taille et masse et de surface, pour certaines, très complexe ;*
- L'échelle de temps : plus d'une dizaine d'années entre le début de fabrication de l'appareil et sa mise en service, période au cours de laquelle les spécifications auxquelles devaient répondre l'appareil ont changé, avec mise en application de la nouvelle norme selon un protocole paru par étapes et tardivement.*

*Il convient enfin de signaler qu'un problème connexe est venu troubler la sérénité du débat : la découverte de certaines irrégularités dans la documentation, qualifiées, avant toute analyse, de falsifications, terme en l'occurrence impropre puisqu'il n'y a pas eu dissimulation. Sans incidence réelle sur la qualité du produit puisque cela ne concernait pas des pièces EPR, ce problème supplémentaire est venu alourdir de façon extrêmement importante la charge de travail d'AREVA*

*C'est le 12 octobre 2017 que l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) a donné un avis favorable à l'utilisation de la cuve et son couvercle fabriqués à partir de 2006 : cette autorisation est assortie de quelques conditions que l'exploitant devra respecter.*

La question est née à la suite d'une interférence entre le début de la fabrication des pièces de la cuve et l'émission concomitante d'une nouvelle réglementation des appareils à pression (Arrêté de décembre 2005 dit ESPN – Enceintes Sous Pression Nucléaires) plus exigeante que la réglementation de 1979 à laquelle elle se substitue. Les difficultés d'interprétation de cette nouvelle règle n'ont été éclaircies que progressivement – un guide d'application N°19 a encore été émis en mars 2013, jusqu'à faire apparaître la question de la teneur en carbone des zones centrales, qui a nécessité des mesures et leur exploitation avant que la question ne soit évoquée publiquement en 2015.

Les pièces respectaient les obligations de la réglementation de 1979 et AREVA a fait preuve d'une totale transparence dans les négociations avec l'ASN. Il n'y a aucun lien entre cette question et la question des anomalies documentaires constatées ultérieurement à l'usine du Creusot, qui font l'objet d'un traitement complètement distinct de celui qui est décrit dans la suite de ce document.

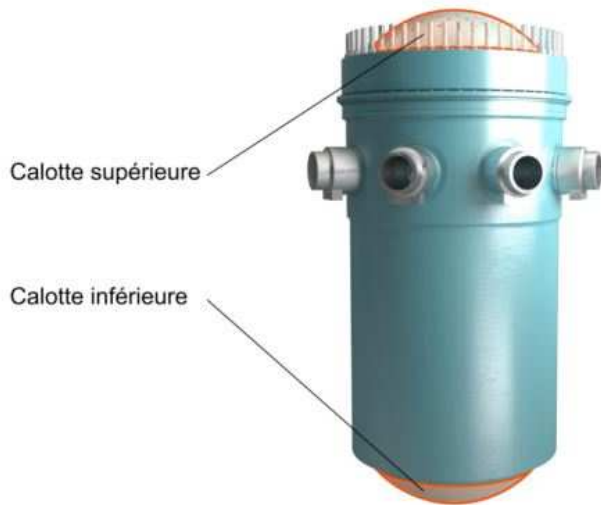
L'arrivée sur site de la cuve du réacteur en 2013 et son montage début 2014 ont été suivis d'un grand nombre d'études et analyses complémentaires pour justifier sa sûreté dans les conditions réglementaires, que nous verrons plus loin. Analyses sur pièces originales elles-mêmes mais aussi sur des pièces neuves identiques, fabriquées dans les mêmes conditions, qui ont subi des essais destructifs (pièces dites sacrificielles ce qui est peu courant).



Arrivée de la cuve de l'EPR (European Pressure Reactor) sur le site de Flamanville

La cuve du premier EPR construit en France a été fabriquée dans les usines de Creusot-Loire en 2006 et 2007, et le dossier de fabrication envoyé par AREVA à l'Autorité de Sûreté en 2008. Après discussion avec les Autorités, un dossier plus complet a été envoyé par AREVA en 2010. En

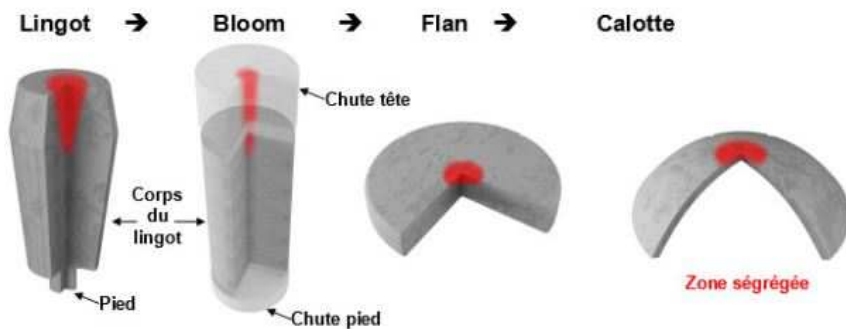
2011/2012, l'Autorité a demandé davantage d'examens dans la zone de la calotte inférieure et la calotte supérieure (couvercle amovible), que l'on peut voir ci-dessous.



Le problème vient de la constatation d'un excès de carbone dans certaines zones du fond de cuve et du couvercle de la cuve. Il y a en effet une petite quantité de carbone allant jusqu'à 0,32 % dans l'acier, ce carbone ayant un effet favorable à la résistance mécanique, mais défavorable pour la ténacité (diminution de la résistance de l'acier à la propagation d'une fissure). Il existe un optimum dans la zone de 0,20 à 0,22 %, reconnue par le code RCCM (Code de construction des équipements sous pression nucléaires). Or, des mesures ont donné des valeurs locales allant jusqu'à 0,32 %. Pourquoi ces pics ? La figure suivante montre les

phases d'élaboration du lingot d'acier dans le moule vertical qui reçoit l'acier en fusion, le carbone plus soluble dans les zones chaudes se concentre dans celles-ci, en particulier au centre du haut du lingot qui se refroidit en dernier.

### Zones des Calottes de cuve



### Étapes successives de forgeage du fond et du couvercle de la cuve En rouge, zone présentant un excès de carbone

La pratique est d'éliminer après solidification le haut du lingot, mais il s'est avéré que l'on n'avait pas suffisamment enlevé de matière dans la zone en rouge contenant un excès de carbone, et il restait des pics à 0,32 %. Le délai de fabrication d'une nouvelle cuve avec son couvercle étant jugé réhibitoire, AREVA et EDF décidèrent de démontrer que les caractéristiques réelles des éléments fabriqués étaient suffisantes pour résister aux conditions normales et accidentelles de sollicitations, avec un niveau de sécurité équivalent.

Il s'agit de démontrer que le risque de rupture de la cuve est suffisamment faible, compte tenu de la pression et de la température. Pour la pression, les contraintes sont évidentes et calculables ; pour la température, la résilience (fragilité) entre en compte, et les basses températures, par exemple 0°C dans le code, sont particulièrement défavorables et invraisemblables en exploitation.

Un autre élément est également crucial : la taille des défauts et leur orientation. Le choix effectué pour la taille des défauts est une dimension de 20 mm, limite basse de détection des appareils, opérations de détection faites par AREVA sous le contrôle d'un organisme indépendant mandaté

par l'ASN. Les analyses ont conduit à prélever un grand nombre d'échantillons, dont des prélèvements destructifs effectués sur deux pièces sacrificielles [U1], analysés par AREVA et les organismes indépendants. Le tableau ci-dessous présente l'échantillonnage conséquent réalisé, le nombre d'essais mécaniques (1722) ainsi que le nombre analyses chimiques (1503) dont beaucoup ont été faites par les organismes mandatés par l'Autorité de Sûreté Nucléaire. Le rapporteur au Groupe permanent d'experts note que la quantité de paramètres et de données dépasse ce qui est habituellement analysé dans le cadre des qualifications techniques des opérations et notamment lors du traitement d'une non-conformité.

Tests	Température	FA3 INF		FA3 SUP		UK SUP		UA INF			UA SUP			TOTAL	
		Recette	Recette	Recette	Seg. 1/4 ep.	Seg. 1/2 ep.	Recette	Seg. 1/4 ep.	Seg. 1/2 ep.	Seg. 3/4 ep.	Recette	Seg. 1/4 ep.	Seg. 1/2 ep.		Seg. 3/4 ep.
Charpy (transition)	Variable (dont 0°C)	18	18	18	72	52	18	36	36	36	18	36	36	36	430
Charpy (RTNDT)	Fonction de TNDT	-	-	-	2 x 12	2 x 12	-	12	12	12	-	2 x 12	2 x 12	12	144
CT26	50°C & 330°C	6	6	6	12	8	6	9	9	9	6	10	10	10	107
CT12.5	variable	40	40	48	144	84	38	72	72	48	20	74	72	48	800
Traction (interprétation CT26)	50°C & 330°C	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	136+9 en peau
Traction	Ambiante	7	7	7	3	3	7	3	3	3	7	3	3	3	
Traction (interprétation CT12.5)	variable	6	6	6	14	6	6	6	6	6	6	6	6	6	96
PELLINI	variable	-	-	-	2 x 8	2 x 8	-	8	8	8	-	2 x 8	2 x 8	8	96
Total par zone (hors analyses chimiques)		72	72	80	287	195	70	148	148	124	52	171	169	125	1722
Nombre d'analyses chimiques		18	18	74	286	193	19	143	147	122	17	167	169	121	1503

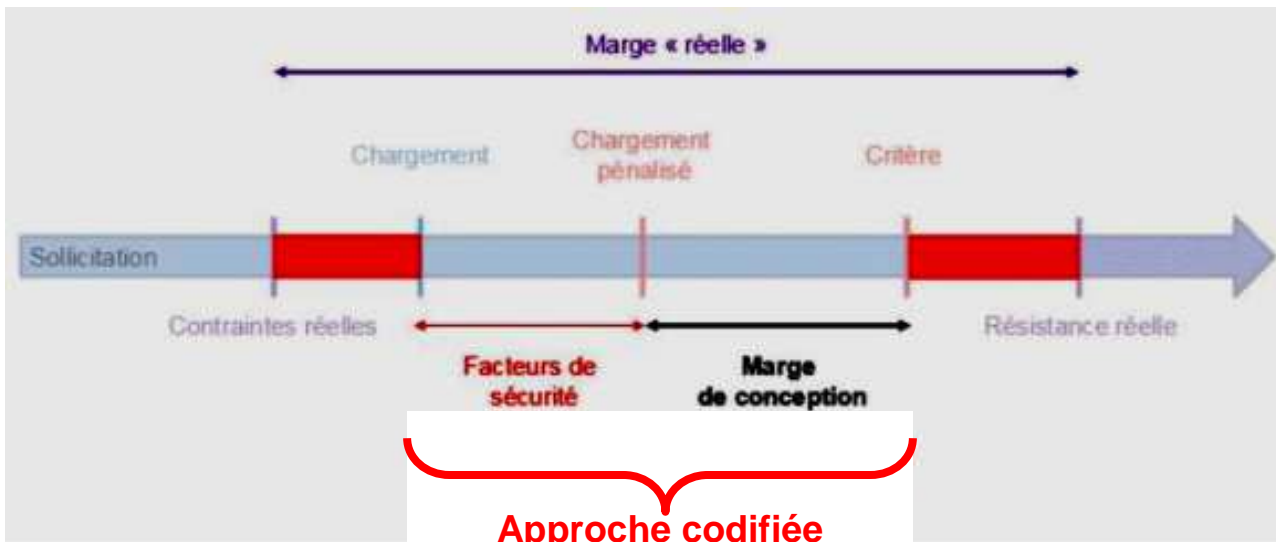
### Synthèse du programme



L'IRSN a vérifié les calculs réalisés par Areva NP par comparaison aux résultats de ses propres calculs. L'analyse de sûreté a consisté à vérifier :

- Le caractère pénalisant de la taille et de l'orientation des défauts postulés
- Le caractère conservatif des chargements thermomécaniques (dû essentiellement à des chocs thermiques)
- La prise en compte des facteurs de sécurité conventionnels
- Que les propriétés mécaniques enveloppent les résultats d'essais, de manière conservative

Les marges obtenues à l'issue de ces calculs sont positives et l'aptitude au service du composant est démontrée



## Conclusion

Ces éléments ont été approuvés par l'IRSN et le Groupe Permanent d'Experts Réacteurs reconnus par l'ASN. **La ténacité a été jugée suffisante pour prévenir avec un coefficient de sécurité acceptable la rupture du fond de cuve et de son couvercle.** La taille des défauts postulés est jugée suffisamment conservative. La figure montre les contraintes réelles à gauche, augmentées de facteurs de sécurité et de marges de conception pour aboutir à la résistance réelle.

Un troisième élément est l'influence de l'irradiation des aciers par la réaction nucléaire. Compte tenu des protections axiales et périphériques du cœur, cet effet n'est pas significatif. Il est néanmoins prévu un examen de détection de l'évolution des défauts du fond de cuve après plusieurs années d'exploitation (visite décennale).



La vue de l'accès au couvercle apparaît sur la figure ci-après.

Ce contrôle n'est pas praticable pour le couvercle de la cuve, compte tenu des nombreuses pénétrations pour les mécanismes de barres de contrôle et d'arrêt du réacteur que l'on voit en figure ci-dessous. Sauf élément nouveau, l'ASN demande donc la mise en place d'un nouveau couvercle d'ici fin 2024.



Couvercle de cuve du réacteur vu de dessus et de dessous

A noter que l'épreuve hydraulique de la cuve avec son couvercle sera faite avec de l'eau à 35°C pour l'épreuve initiale et 60°C pour les requalifications périodiques pour se rapprocher des conditions réelles d'un arrêt. Ont été rajoutées des consignes et des sécurités spécifiques sur les pompes primaires pour supprimer l'occurrence d'un refroidissement brutal de la cuve qui pourrait donner un chargement thermomécanique excessif.