



**Anomalie  
de la composition de l'acier  
du fond et du couvercle  
de la cuve du réacteur EPR  
de la centrale nucléaire  
de Flamanville**

**AG CLI de Flamanville**

**10 octobre 2017**



# Plan

1. Historique et consultations
2. Conclusions de l'instruction ASN-IRSN
3. Présentation de l'avis du GP ESPN
4. Projet d'avis de l'ASN
5. Consultation du public

- **Fin 2014 : détection d'une anomalie de la composition de l'acier du fond et du couvercle de la cuve du réacteur EPR de Flamanville**
- **2015 : Proposition d'une démarche de justification par Areva NP et accord de l'ASN sur cette démarche**
- **2016 : Réalisation d'un programme d'essais**
- **2017 : Instruction commune par les spécialistes de l'IRSN et de la direction des équipements sous pression nucléaires de l'ASN**
- **26 et 27 juin 2017: réunion du Groupe permanent d'experts ESPN**
  - Observateurs d'autorités de sûreté étrangères
  - HCTISN
  - Société civile
- **Avis du GP ESPN sur le dossier d'Areva NP**



## Avis de l'ASN et consultations

- **Juillet 2017 : Projet d'avis de l'ASN sur le dossier d'Areva NP**
- **Consultation du public du 10 juillet au 12 septembre 2017**
- **Consultation du Conseil Supérieur de la Prévention des Risques Technologiques (CSPRT) (séances du 12 et 19 septembre 2017) sur le projet de l'avis de l'ASN**

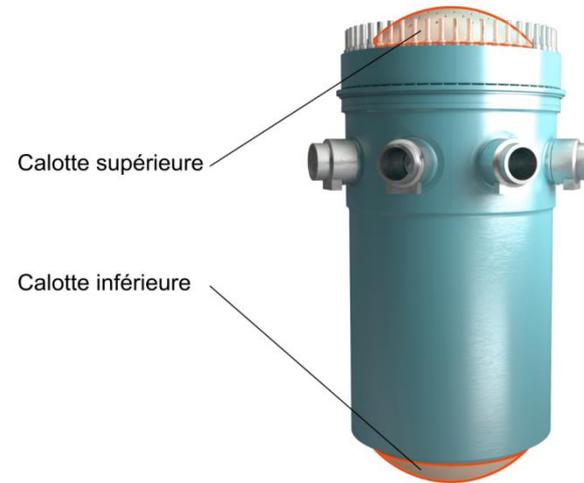
**Conclusions de l'instruction  
par l'ASN et l'IRSN  
des conséquences de l'anomalie  
des calottes de la cuve  
du réacteur EPR de Flamanville  
sur leur aptitude au service**

1. Démarche de justification
2. Contrôles par essais non destructifs réalisés lors de la fabrication
3. Caractérisation du matériau  
    Résultats et interprétation du programme d'essais
4. Chargements thermomécaniques
5. Analyse du risque de rupture brutale
6. Lien avec la démonstration de sûreté de l'installation - suivi en service

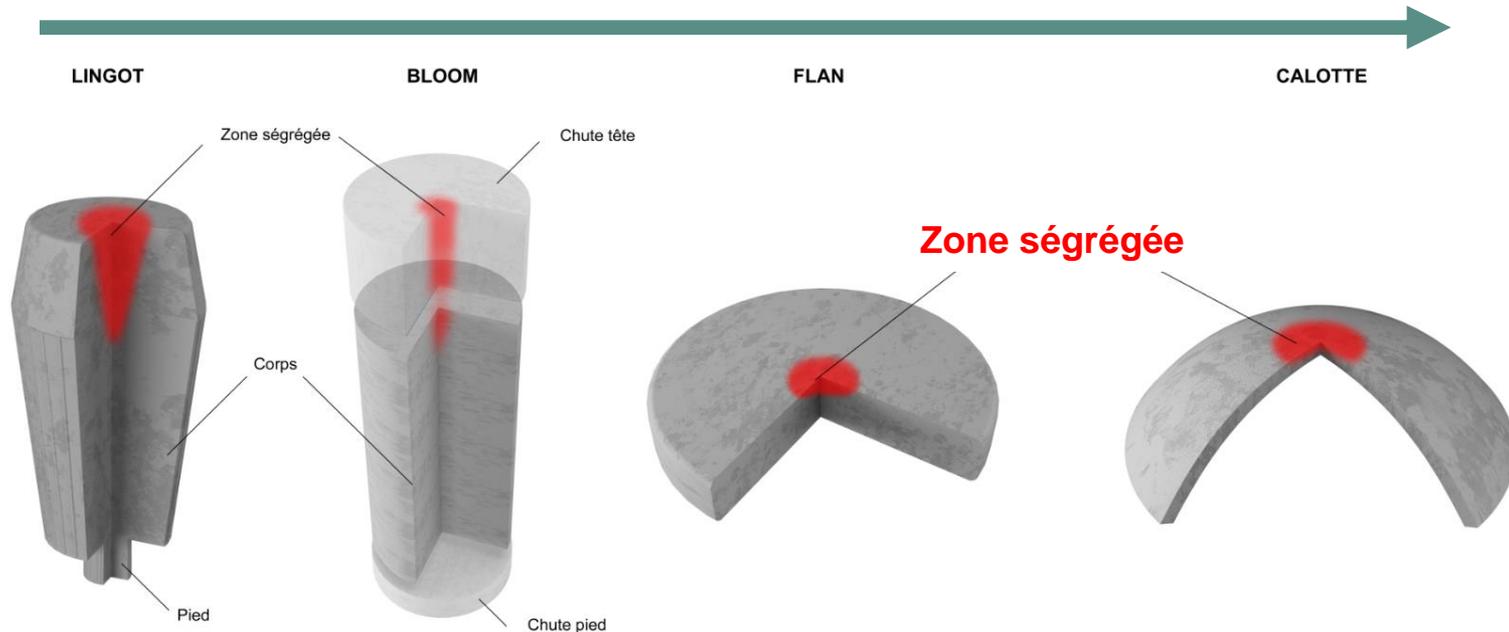
- **Fin 2014 : détection d'une anomalie de la composition chimique de l'acier du fond et du couvercle de la cuve du réacteur EPR de Flamanville**
  - Excès de carbone au centre
  - Propriétés mécaniques moins bonnes qu'attendu
  
- **Aspects réglementaires**
  - Exigence de qualification technique (point 3.2 annexe I de l'arrêté ESPN) : la qualité attendue n'est pas atteinte
  - Areva NP n'a pas suffisamment tenu compte de l'état d'avancement de la technique et de la pratique au moment de la conception et le fabrication des composants (annexe I de la directive européenne 2014/68/UE)



- Article 9 de l'arrêté ESPN du 30/12/2015 :
  - « *En application de l'article R. 557-1-3 du code de l'environnement, en cas de difficulté particulière et sur demande dûment justifiée, assurant notamment que les risques sont suffisamment prévenus ou limités, **l'Autorité de sûreté nucléaire peut, par décision prise après avis de la Commission centrale des appareils à pression, autoriser l'installation, la mise en service, l'utilisation et le transfert d'un équipement sous pression nucléaire ou d'un ensemble nucléaire n'ayant pas satisfait à l'ensemble des exigences** des articles L. 557-4 et L. 557-5 du code de l'environnement, du chapitre VII du titre V du livre V de la partie réglementaire du code de l'environnement et du présent arrêté. »*
  
- Areva NP doit transmettre :
  - Le dossier technique relatif à l'anomalie de concentration en carbone de l'acier
  - Les éléments relatifs à la conformité aux autres exigences réglementaires. Cela nécessite notamment une épreuve hydraulique d'ensemble du circuit primaire principal (prévue par EDF fin 2017).



- **Cause : présence d'une zone de ségrégation majeure positive résiduelle en carbone au centre de la calotte, non éliminée lors des opérations de chutage du lingot**



Ségrégation positive : phénomène naturel d'enrichissement local en carbone lors du refroidissement du lingot

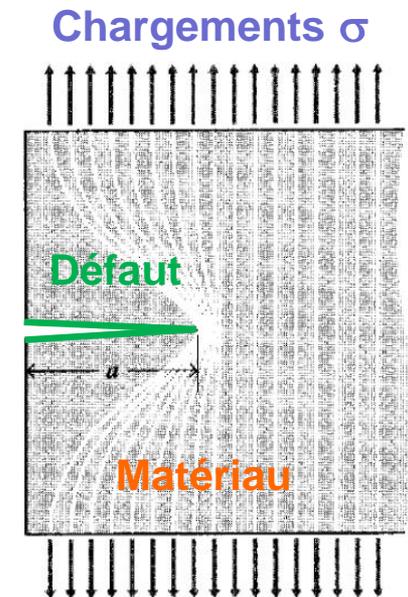
→ Augmentation des propriétés de résistance à la traction mais affaiblissement de la résistance à la propagation d'une fissure (ténacité)

- Risques

- Pas d'impact vis-à-vis des risques de déformation excessive et d'instabilité plastique
- Impact sur le risque de rupture brutale (lié aux propriétés de résilience et de ténacité)  
→ La démonstration de sûreté doit apporter la preuve que la rupture de la cuve n'est pas possible.

- Analyse du risque de rupture brutale

- Objectif : montrer que le **matériau** est suffisamment tenace pour résister à l'amorçage des **défauts** potentiellement existants, sous l'effet de **chargements** thermomécaniques

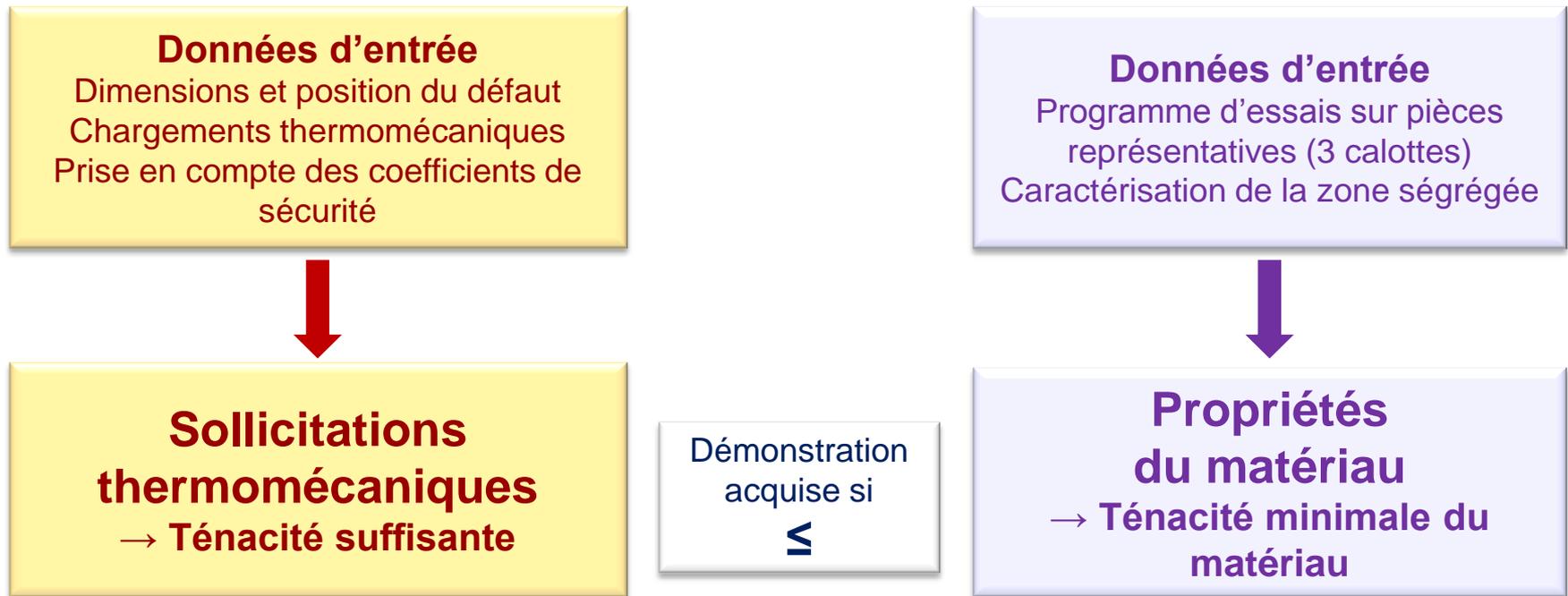


- Démarche en 3 étapes

Étape 1 : Calcul de la **ténacité suffisante** pour prévenir le risque de rupture brutale

Étape 2 : Mesure de la **ténacité minimale du matériau en zone ségréguée**

Étape 3 : Comparaison



- Conclusions de l'instruction ASN/IRSN et du GP ESPN (2015)
  - Démarche acceptable
  - Lancement du programme d'essais

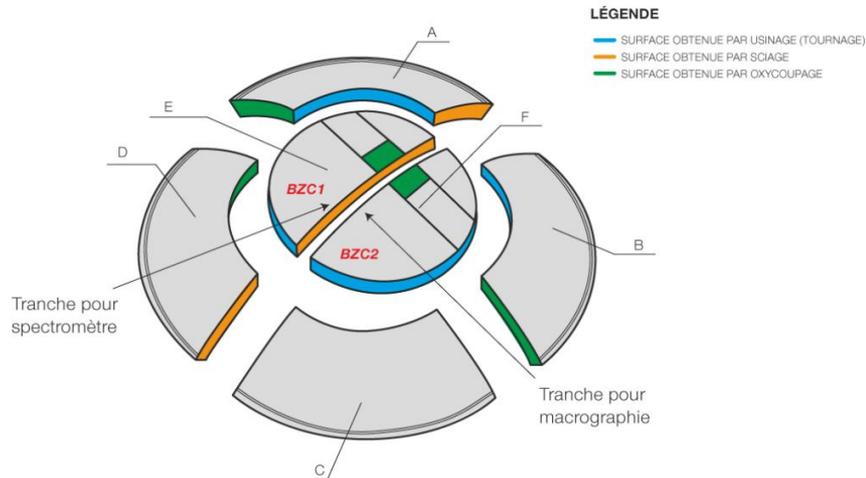
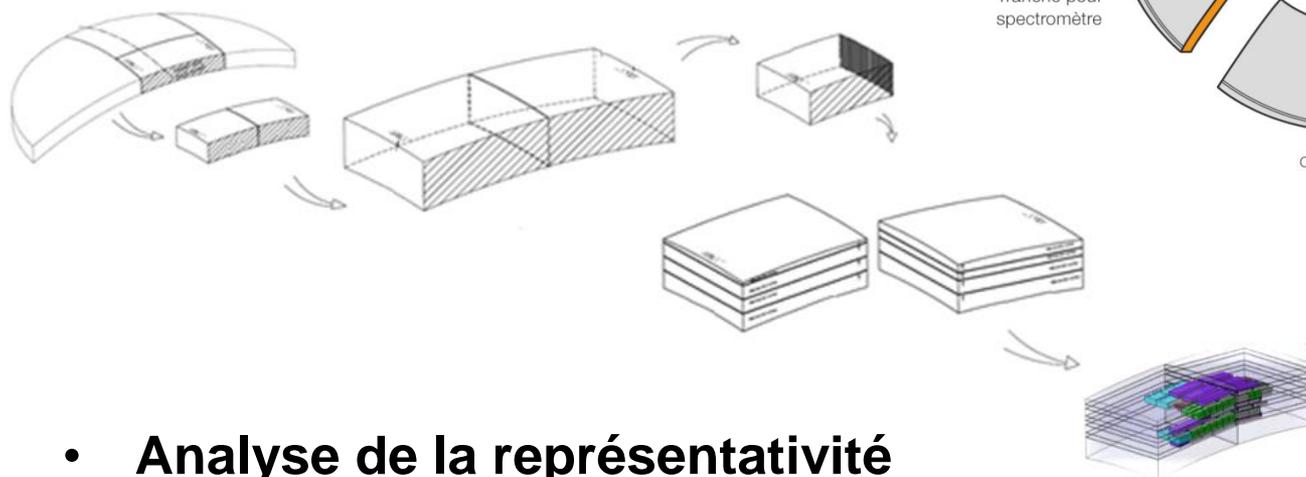
1. Démarche de justification
2. **Contrôles par essais non destructifs réalisés lors de la fabrication**
3. Caractérisation du matériau  
    Résultats et interprétation du programme d'essais
4. Chargements thermomécaniques
5. Analyse du risque de rupture brutale
6. Lien avec la démonstration de sûreté de l'installation - suivi en service

- **Areva NP a réalisé des contrôles non destructifs**
    - Surfaciques et volumiques
    - Surveillés par un organisme habilité mandaté par l'ASN
  - **Aucun défaut de taille supérieure à la limite de détection détecté**
  - **Dans le cadre de l'analyse mécanique, Areva NP a postulé la présence du plus petit défaut détectable**
- **Conclusions de l'instruction ASN/IRSN**
    - Fortes garanties sur l'absence de défauts de taille supérieure à la limite de détection

1. Démarche de justification
2. Contrôles par essais non destructifs réalisés lors de la fabrication
3. **Caractérisation du matériau**  
Résultats du programme d'essais et interprétation
4. Chargements thermomécaniques
5. Analyse du risque de rupture brutale
6. Lien avec la démonstration de sûreté de l'installation - suivi en service

- **Trois calottes sacrificielles**

- 2 calottes supérieures (UK sup et UA sup) et 1 calotte inférieure (UA inf)
- A différentes profondeurs :
  - peaux externe et interne
  - $\frac{1}{4}$  épaisseur
  - $\frac{1}{2}$  épaisseur
  - $\frac{3}{4}$  épaisseur



- **Analyse de la représentativité**

## • Principes

- Identifier les paramètres influençant la résistance à la rupture brutale
- Comparer ces paramètres entre les calottes sacrificielles et les calottes de FA3
- Objectif : déterminer si les calottes sacrificielles sont suffisamment représentatives pour utiliser leurs propriétés mécaniques (issues du programme d'essais) lors de l'analyse de mécanique des calottes FA3

## • Areva NP a retenu deux facteurs prépondérants pour les propriétés de ténacité

- Teneur en carbone : [C] ↗ ténacité ↘
- Effet de trempe :  
vitesse de refroidissement ↗ ténacité ↗



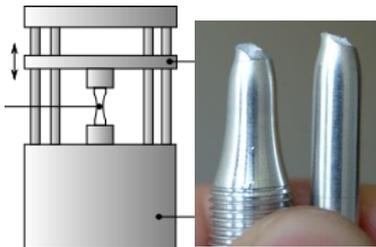
- Areva NP a comparé les paramètres influençant ces deux facteurs prépondérants et les propriétés mécaniques
- Areva NP s'est appuyé sur les dossiers de fabrication, des simulations numériques et des essais physiques

- **Analyse de la représentativité**
  - Valeurs comparables et conformes à l'attendu pour ce type de matériau
  - Les calottes de Flamanville ne se singularisent pas

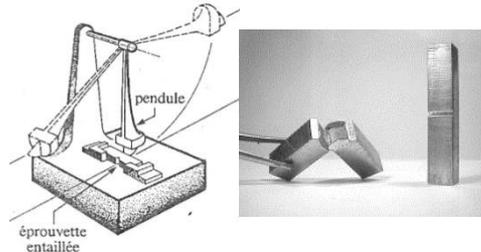
- **Conclusion de l'instruction ASN/IRSN sur la représentativité**
  - Les calottes sacrificielles présentent un niveau de représentativité permettant l'utilisation des résultats du programme d'essais pour l'analyse de la résistance mécanique des calottes de Flamanville, dans le cadre d'une démarche présentant des conservatismes

- **Caractérisation de la zone ségréguée (position et profondeur)**
  - Positionnement des éprouvettes dans les zones avec les plus fortes teneurs en carbone

- **1700 essais mécaniques en zone ségrégée et en zone de recette**
  - 3 Laboratoires accrédités selon la norme NF EN ISO/CEI 17025



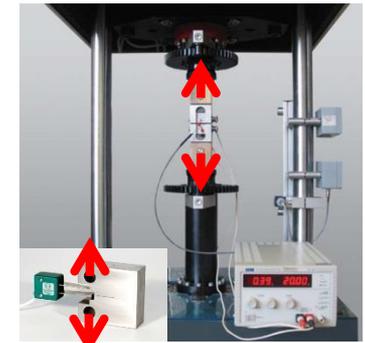
Traction



Résilience



Pellini



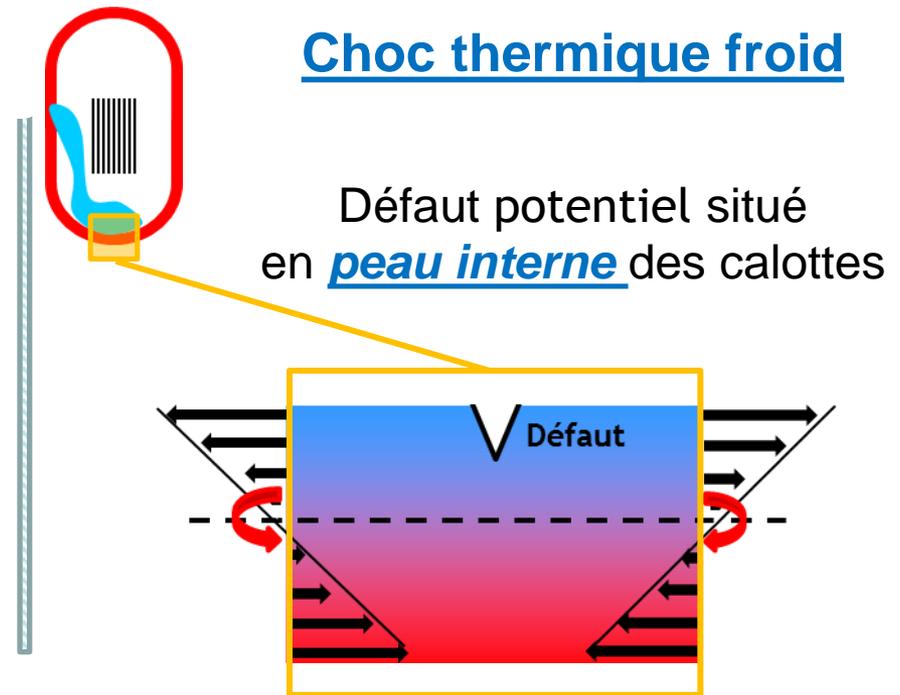
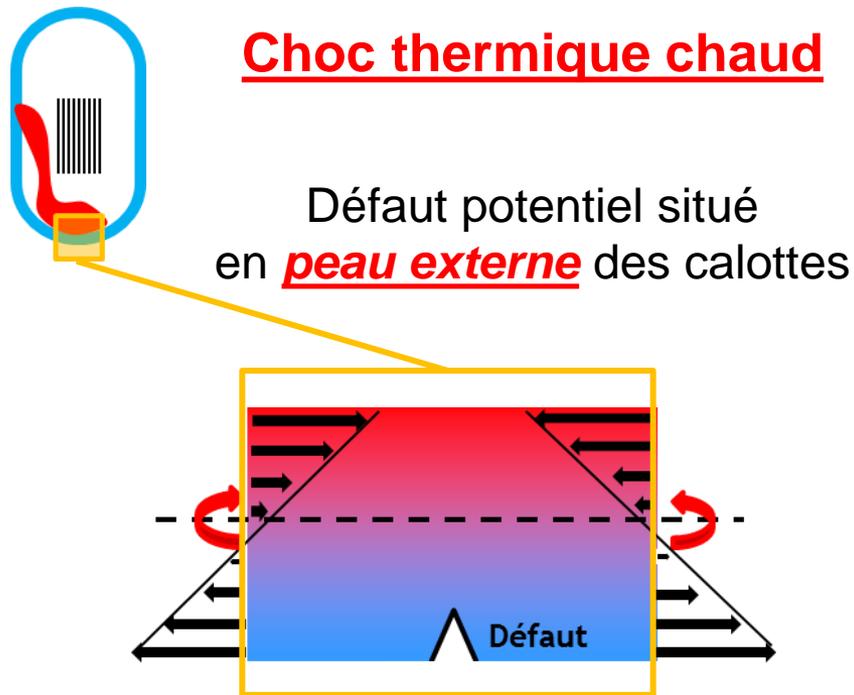
Ténacité

- **1500 analyses chimiques (laboratoire indépendant et accrédité)**
- **Expertises métallurgiques**
- **Surveillance presque à 100% par un organisme habilité mandaté par l'ASN**

- **Connaissances apportées par le programme d'essais**
  - Distribution statistique des résultats conforme à l'attendu (+ caractère suffisant)
  - Résultats caractéristiques du comportement d'un acier ferritique
    - Confirme la nature de l'acier en présence
- **Propriétés en zone de ségrégation**
  - Propriété de traction : L'élévation de la teneur en carbone conduit à une élévation de la limite d'élasticité et de la limite à rupture
  - Propriété de résilience: L'élévation de la teneur en carbone conduit à un abaissement du plateau ductile et à un décalage de la courbe de transition
  - Propriété de ténacité : Effet défavorable de l'excès de carbone sur les propriétés de ténacité

1. Démarche de justification
2. Contrôles par essais non destructifs réalisés lors de la fabrication
3. Caractérisation du matériau  
Résultats et interprétation du programme d'essais
4. **Chargements thermomécaniques**
5. Analyse du risque de rupture brutale
6. Lien avec la démonstration de sûreté de l'installation - suivi en service

- **Identification et caractérisation des transitoires les plus pénalisants**
  - Les situations pénalisantes vis-à-vis du risque d'amorçage d'un défaut potentiel sont celles qui pourraient conduire à l'ouverture de ce défaut
  - Ce risque dépend principalement de la variation de température, du sens de cette variation et de la localisation du défaut potentiel



- **Prise en compte dans l'analyse de mécanique**
  - Chargements les plus limitatifs étudiés pour :
    - Les chocs chauds et les chocs froids
    - La calotte supérieure et la calotte inférieure
    - Les catégories de situations
  - Exemples :
    - Choc froid en catégorie 3 pour la calotte supérieure = rupture de tube de générateur de vapeur (barrière entre le circuit primaire et le circuit secondaire)
    - Choc chaud en catégorie 2 pour la calotte supérieure = arrêt automatique du réacteur à froid

## • **Conclusions de l'instruction de l'ASN/IRSN**

- Exhaustivité  
Le rapporteur a considéré que la démarche adoptée par Areva NP pour identifier les situations de chocs chauds et de chocs froids à l'origine des sollicitations des calottes de la cuve est satisfaisante, après ajout de certaines situations de surpression à froid.
- Caractérisation  
Le rapporteur a considéré que le caractère conservatif des chargements retenus à l'issue de l'instruction est assuré.

1. Démarche de justification
2. Contrôles par essais non destructifs réalisés lors de la fabrication
3. Caractérisation du matériau  
Résultats et interprétation du programme d'essais
4. Chargements thermomécaniques
5. **Analyse du risque de rupture brutale**
6. Lien avec la démonstration de sûreté de l'installation - suivi en service

**Sollicitations  
thermomécaniques**

Prise en compte des coefficients de sécurité  
→ **Ténacité suffisante**

Démonstration  
acquise si  
 $\leq$

**Propriétés  
du matériau**

Programme expérimental  
→ **Ténacité minimale du matériau**

- Le risque de rupture est exclu si l'amorçage d'un défaut est exclu :

**Force fissurante ( $K_{CP}$ )  $\leq$  Ténacité ( $K_{JC}$ )**

- Critère retenu :

**Facteur de marge =  $\frac{K_{JC}}{\alpha \cdot K_{CP}} \geq 1$**

Résultat du programme  
d'essais

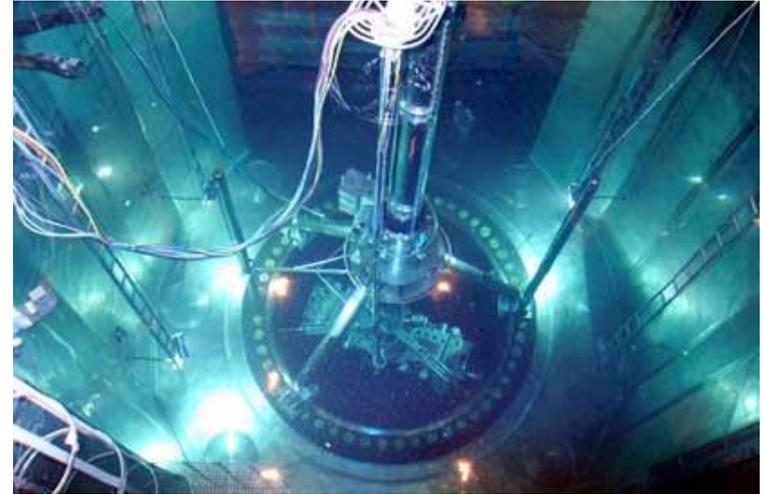
**Plus grand défaut  
potentiel  
Chargement**

- Les marges obtenues à l'issue de ces calculs sont positives : les analyses de résistance mécanique montrent que les propriétés mécaniques sont suffisantes pour prévenir le risque de rupture brutale
- L'aptitude au service du composant est démontrée

1. Démarche de justification
2. Contrôles par essais non destructifs réalisés lors de la fabrication
3. Caractérisation du matériau  
    Résultats et interprétation du programme d'essais
4. Chargements thermomécaniques
5. Analyse du risque de rupture brutale
6. Lien avec la démonstration de sûreté de l'installation - suivi en service

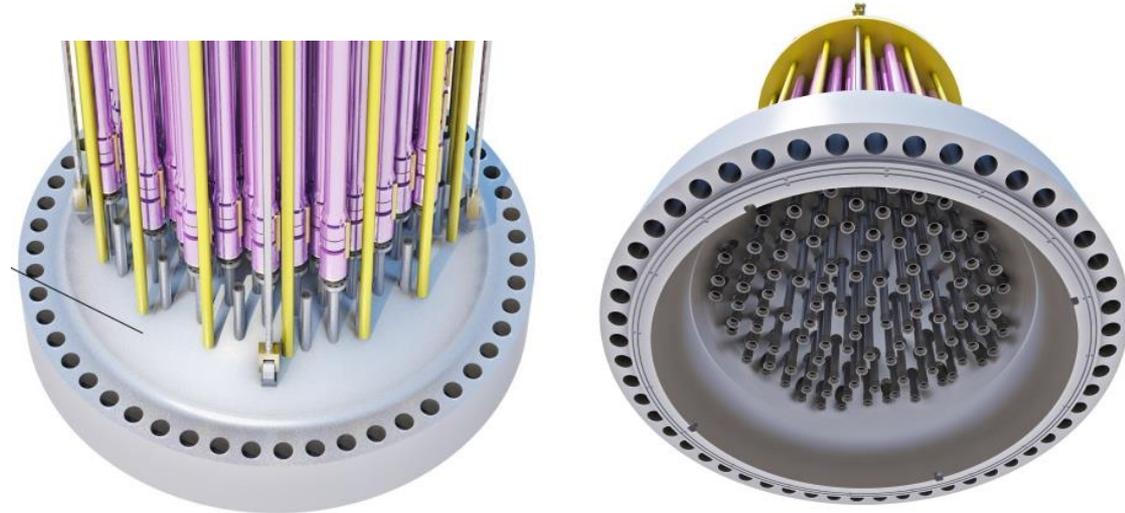
- **Premier niveau de défense en profondeur :**
  - La présence de la ségrégation résiduelle diminue les marges
  - **Le premier niveau de défense en profondeur est affecté sur des composants en exclusion de rupture**
- **La démarche de justification**
  - démontre la suffisance des marges
  - mais ne restaure pas les garanties liées au premier niveau de défense en profondeur
  - doit être complétée par des dispositions de suivi en service (deuxième niveau de défense en profondeur) afin de renforcer la défense en profondeur de manière générale
- **Même si aucun mode de dégradation n'est anticipé**
  - **EDF s'est engagée à la fin de l'instruction à réaliser des contrôles en service afin de vérifier périodiquement l'absence de défauts nocifs**

- **EDF prévoit de contrôler le fond de cuve à chaque requalification**
  - Contrôles permettant de détecter des défauts de 10 mm
- **Ces contrôles prévus par EDF permettent de renforcer le deuxième niveau de défense en profondeur**



- **Conclusions de l'instruction ASN/IRSN**
  - Les analyses de résistance mécanique montrent que les propriétés mécaniques sont suffisantes pour prévenir le risque de rupture brutale
  - Des contrôles permettent de vérifier périodiquement l'absence de défauts
  - L'anomalie ne remet pas en cause l'aptitude au service du fond

- **La faisabilité technique de contrôles similaires sur le couvercle de la cuve n'est pas acquise**



- **Conclusions de l'instruction ASN/IRSN**
  - Les analyses de résistance mécanique montrent que les propriétés mécaniques sont suffisantes pour prévenir le risque de rupture brutale
  - Toutefois, l'utilisation du couvercle actuel ne peut pas être envisagée au-delà de quelques années de fonctionnement sans la mise en œuvre de contrôles en service nécessaires au renforcement du deuxième niveau de défense en profondeur



# Présentation de l'avis du GP ESPN



## Conclusion sur la démarche de justification

- « propriétés mécaniques d'un niveau suffisant pour prévenir les risques redoutés et assurer l'**aptitude au service** des calottes »
- « la robustesse du premier niveau de **défense en profondeur** » est affectée

## Dispositions de suivi en service

- **Nécessaires** pour renforcer le deuxième niveau de défense en profondeur
- Fond de la cuve : **contrôles possibles**
- Couvercle de cuve :
  - **Faisabilité technique pas acquise à ce stade**
  - Le GP considère qu'EDF doit apporter sous 2 ans des éléments de démonstration de la faisabilité des contrôles
  - Le GP note que le couvercle est remplaçable

## Teneur des débats et niveau de consensus

- Débats étendus sur 2 jours
  
- Consensus sur les éléments de démarche
- Les experts ont exprimé différentes positions sur:
  - les conclusions sur la démarche de justification
  - le suivi en service et la durée d'exploitation des calottes
- Avis minoritaire de deux membres

**Projet d'avis de l'ASN  
relatif à l'anomalie  
de la composition de l'acier  
du fond et du couvercle  
de la cuve du réacteur EPR  
de la centrale nucléaire  
de Flamanville (INB n° 167)**

## L'ASN considère que :

- **les caractéristiques mécaniques du matériau**, bien qu'inférieures à celles prévues lors de la conception, **sont suffisantes** pour exclure, avec les coefficients de sécurité requis, le risque de rupture brutale du fond et du couvercle de la cuve
- **la démonstration de sûreté nucléaire exclut la rupture de la cuve** sur la base de dispositions particulièrement exigeantes retenues en matière de conception, de fabrication et de suivi en service
- l'aptitude au service du fond et du couvercle de la cuve repose sur une justification d'exclusion du risque de rupture brutale fondée sur :
  - les dimensions d'un **défaut** potentiel
  - les **propriétés mécaniques** de l'acier comportant un excès de carbone
  - les **chargements thermomécaniques**
- il est essentiel de **s'assurer tout au long du fonctionnement du réacteur que ces paramètres restent dans le cadre de la justification** et notamment de garantir l'absence d'apparition de défaut
- il est par conséquent nécessaire qu'EDF mette en œuvre des **contrôles périodiques** complémentaires afin de s'assurer de l'absence d'apparition ultérieure de défauts

- **Fond de la cuve**
  - L'ASN constate que de tels contrôles sont réalisables sur le fond de la cuve
  - L'ASN considère qu'ils doivent donc être mis en œuvre
- **Couvercle de la cuve**
  - La faisabilité technique de contrôles similaires sur le couvercle de la cuve n'est pas acquise. L'ASN considère donc que l'utilisation de ce couvercle doit être limitée dans le temps.
  - L'ASN note qu'un nouveau couvercle pourrait ainsi être disponible d'ici fin 2024 et il n'a pas été identifié de mécanisme conduisant à créer ou propager un défaut. Elle considère que l'utilisation du couvercle actuel est acceptable pour la sûreté jusqu'à cette date.
  - Dans ces conditions, l'ASN considère que l'utilisation du couvercle actuel ne pourra être autorisée au-delà de 2024.
- **L'ASN considère que l'anomalie de composition chimique n'est pas de nature à remettre en cause la mise en service de la cuve, mais l'utilisation du couvercle actuel ne pourra être autorisée au-delà du 31 décembre 2024.**



# Consultation du public





## Association du public

- **Communication de l'ASN sur la découverte de l'anomalie en avril 2015**
- **Ouverture des séances du GP ESPN à la société civile**
- **4 réunions de dialogues techniques avec ANCCLI, CLI et associations de défense de l'environnement**
- **2 passages devant l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST)**
- **Dossier pédagogique sur le site de l'ASN**  
<https://www.asn.fr/Informer/Dossiers-pedagogiques/Anomalies-de-la-cuve-de-l-EPR-et-irregularites-usine-Creusot-Forge-d-AREVA/Anomalies-de-la-cuve-de-l-EPR>
  - Notes d'information de l'ASN
  - Avis du GP ESPN
  - Présentations des dialogues techniques



## Consultation du public

- **Du 10 juillet au 12 septembre 2017 : plus de 13 800 commentaires de particuliers**
- **Retours de la CLI de Flamanville**
- **Retours d'EDF et Areva NP**

