

IRSN

INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Faire avancer la sûreté nucléaire

VIEILLISSEMENT sous IRRADIATION des CUVES de REACTEUR du PARC FRANÇAIS

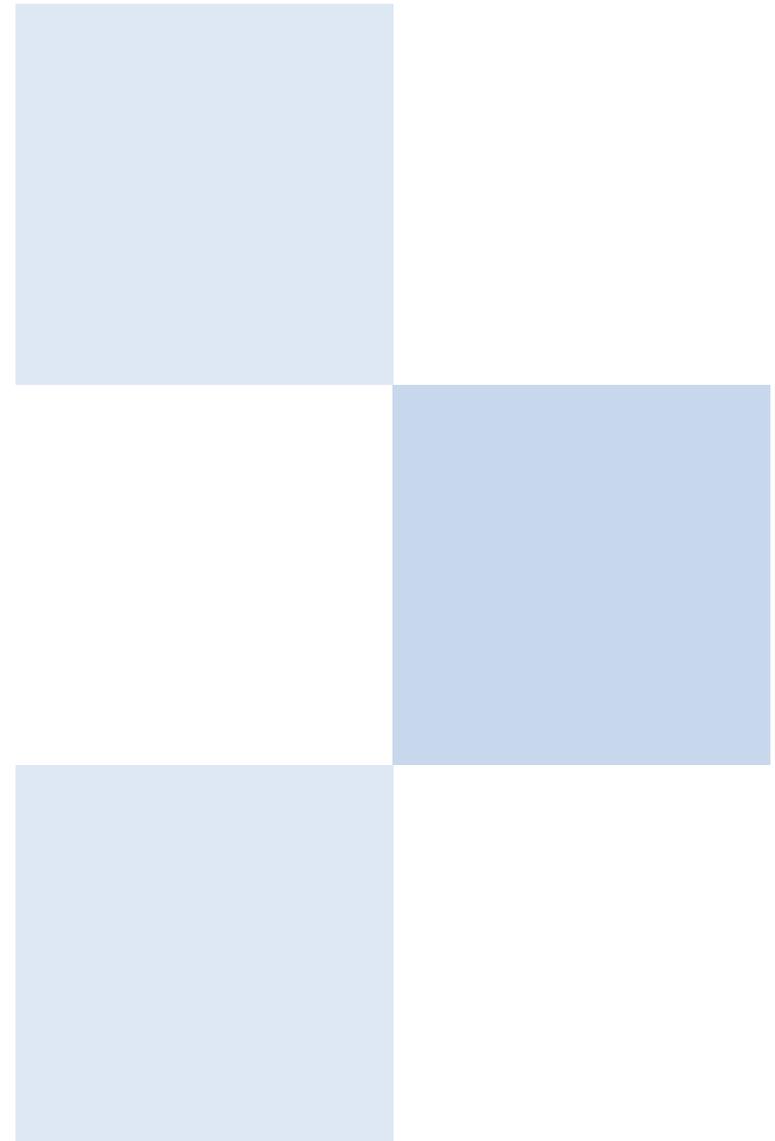
- ❖ Caractéristiques et enjeux de sûreté
- ❖ Conception et fabrication
- ❖ Irradiation
- ❖ Inspection en service
- ❖ Impact Doel 3 Tihange 2 en France
- ❖ Tenue en service
- ❖ Conclusions

Réunion ANCCLI
09 septembre 2014



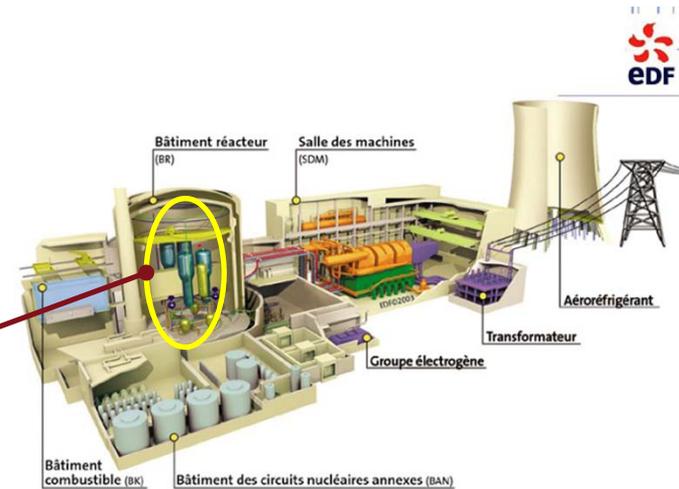
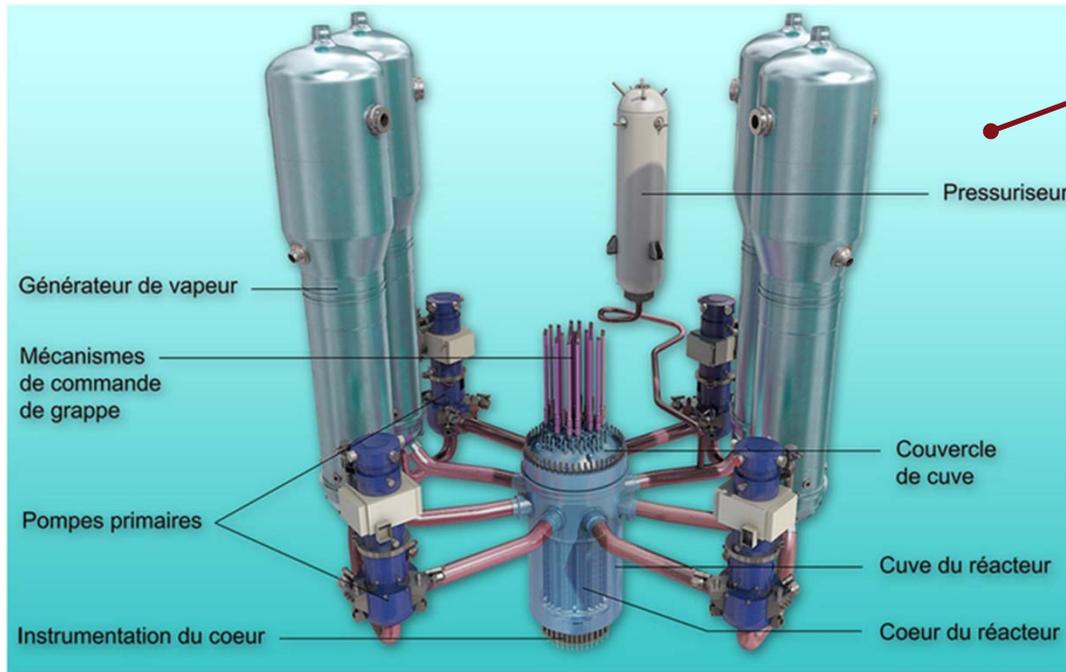
CARACTERISTIQUES

ENJEUX DE SÛRETÉ



Caractéristiques et enjeux de Sûreté

❑ SITUATION et FONCTION de la CUVE



- ❑ Fonction : contenir le cœur du réacteur et ses dispositifs de commande et d'instrumentation

❖ Caractéristiques et enjeux de Sûreté

❑ Caracteristiques :

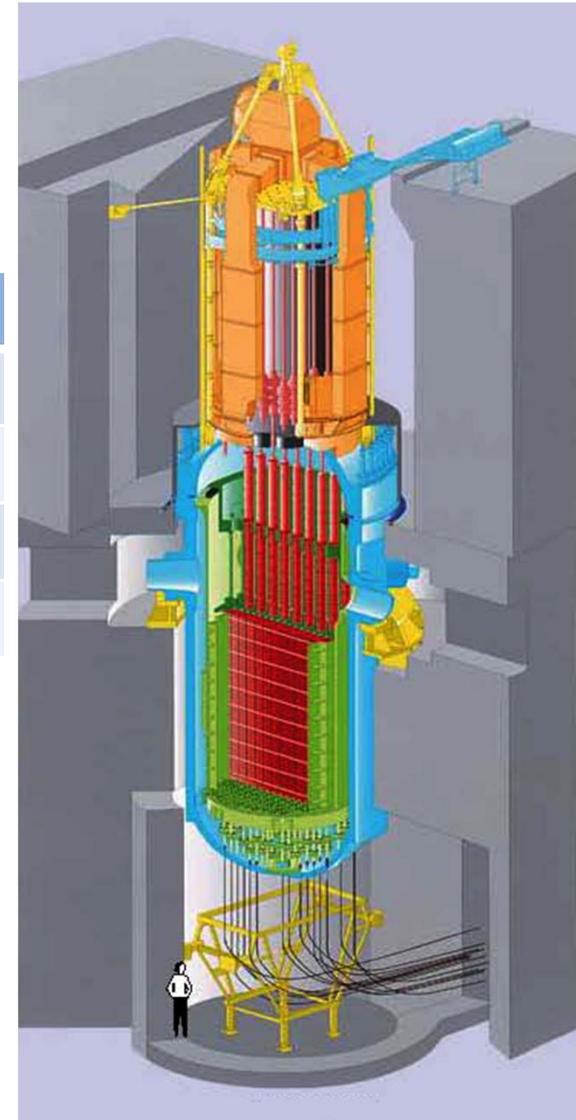
▪ Composant de grandes dimensions

	900 MWe	1300 MWe	N4	EPR
H (m)	12	12,5	12,9	12,7
Epaisseur (mm)	200	220	225	250
Diamètre (m)	3,9	4,39	4,48	4,85
Poids (t)	330	440	460	510

▪ Sollicitations

- Température de fonctionnement : 325°C
- Pression 155 bars
- Débit $\approx 30 \text{ m}^3/\text{s}$

©AREVA



❖ Caractéristiques et enjeux de Sûreté

❑ Rôles de sûreté :

✓ La cuve est au croisement des 3 fonctions principales de sûreté :

- Maitrise de la réaction nucléaire
- Refroidissement du cœur
- Confinement des éléments radioactif

❑ Composant non ruptible

❑ Remplacement n'est pas envisagé

❑ Son intégrité conditionne la durée de vie de la centrale

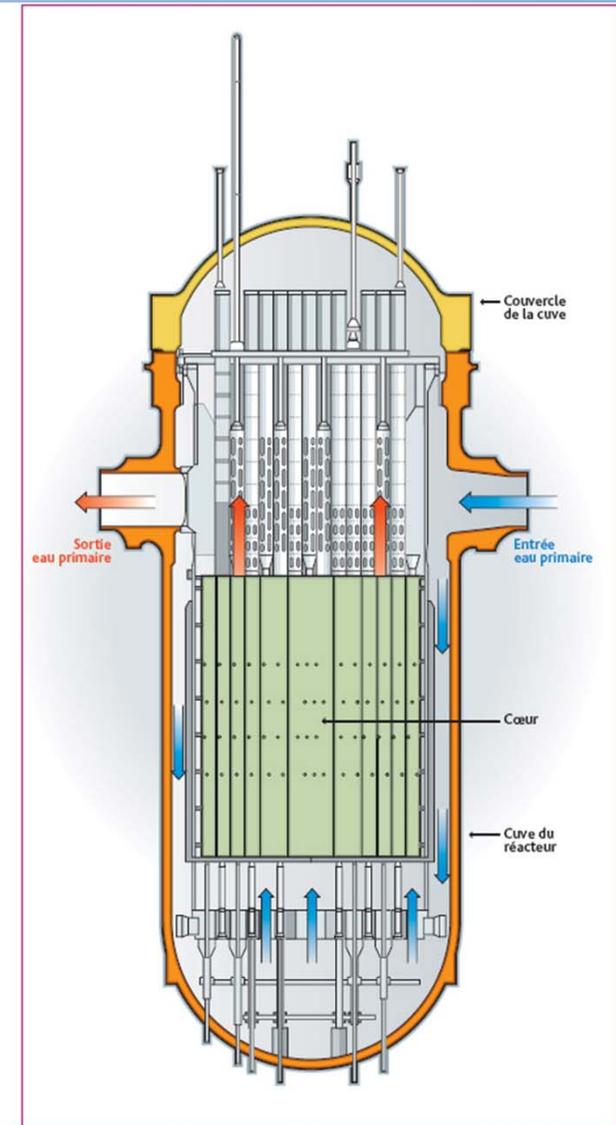
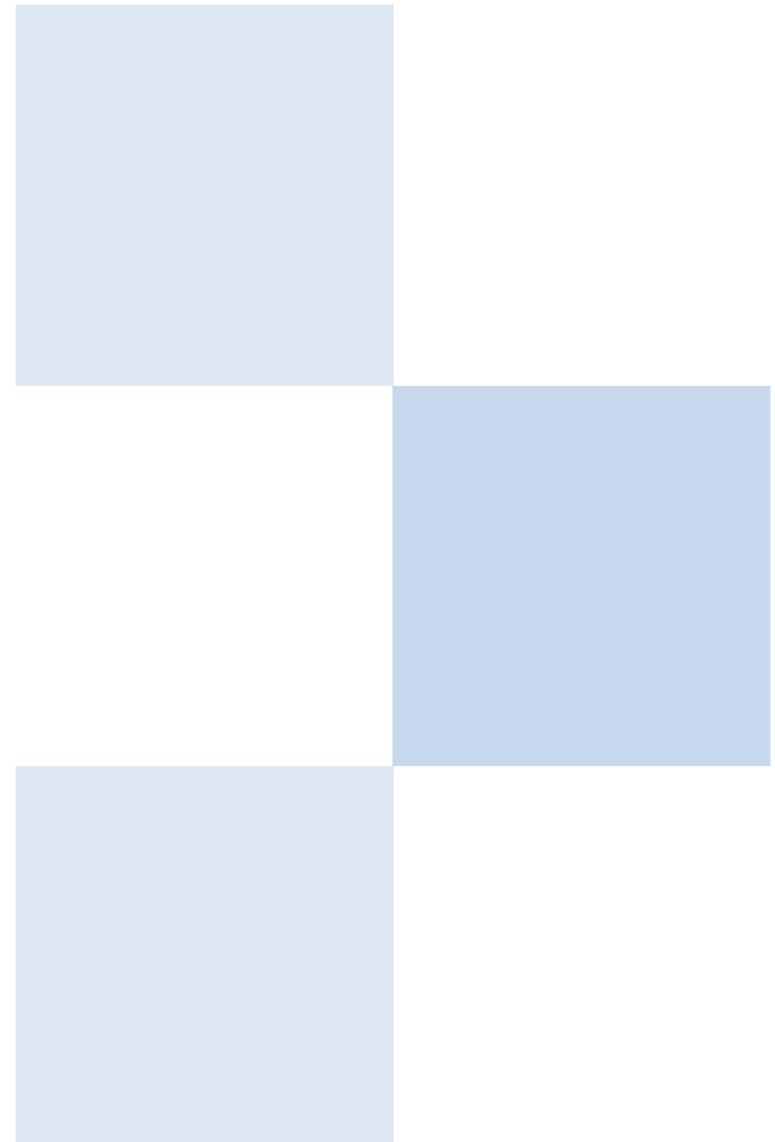


Figure 1 : Coupe de la cuve d'un réacteur de 900 MWe.



CONCEPTION

FABRICATION



❖ Conception et fabrication

❑ Objectifs visés : très haut niveau de qualité

❑ Dispositions réglementaires

- Arrêté 26 février 1974
- Arrêté du 12 décembre 2005 (ESPN)

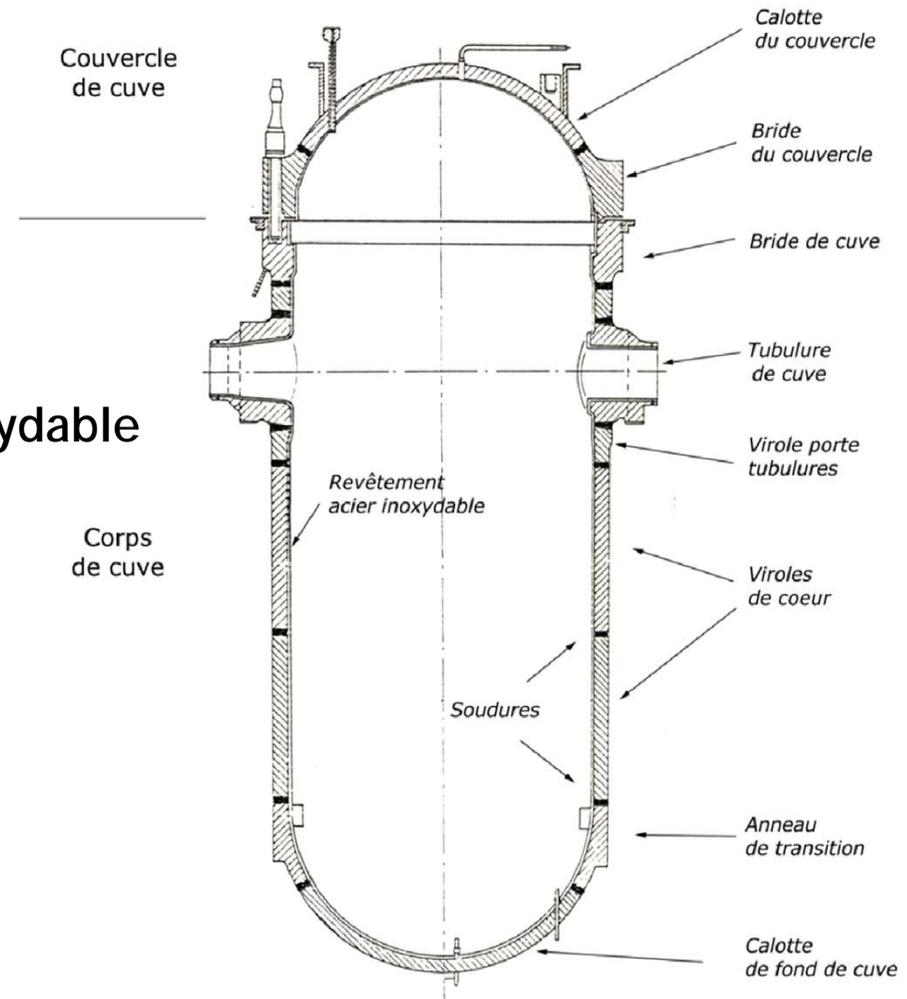
❑ Conception

- Prévention des différents modes d'endommagement
- Coefficient de sécurité modulé en fonction des situations de fonctionnement (normale - exceptionnelles - accidentelles)
- Choix des matériaux (rupture brutale - irradiation)

❖ Conception et fabrication

❑ Fabrication

- Acier 16MND5
- Pièces forgées
- Assemblage par soudage
- Revêtement en acier inoxydable surface intérieure



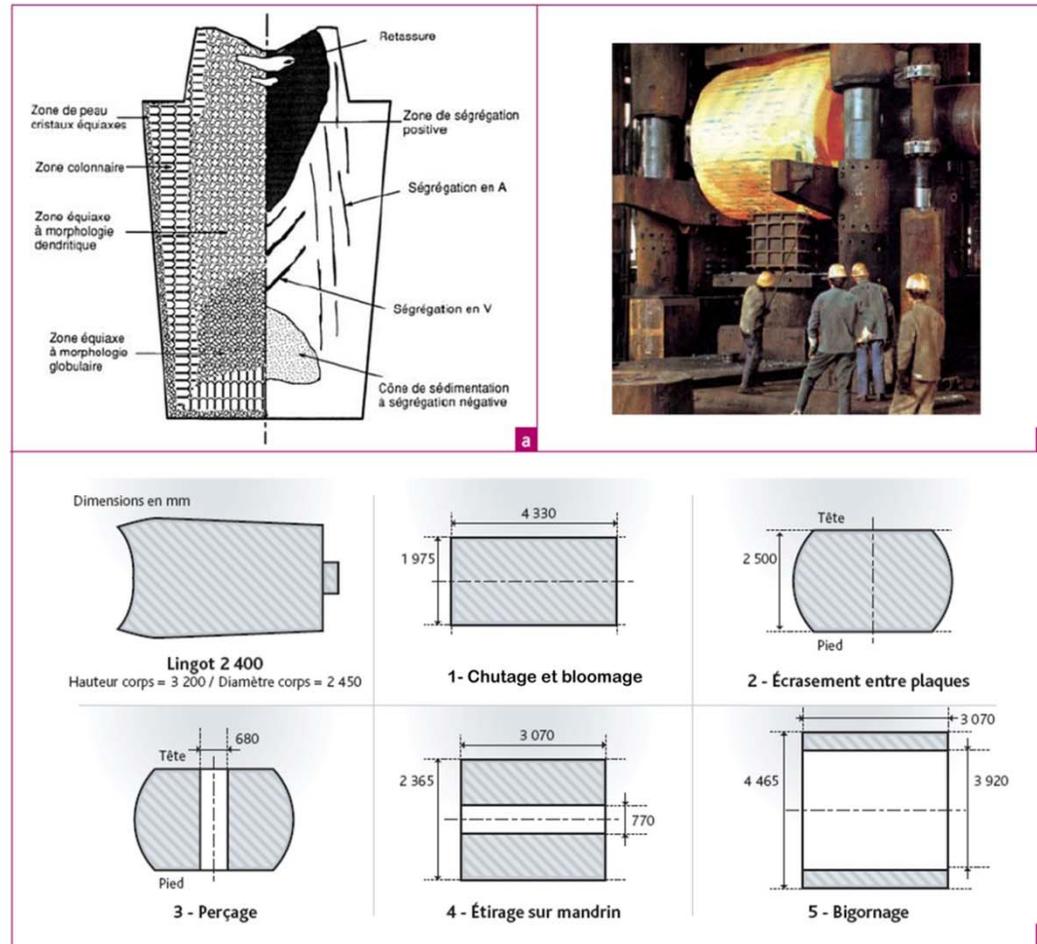
❖ Conception et fabrication

❑ Fabrication



❖ Conception et fabrication

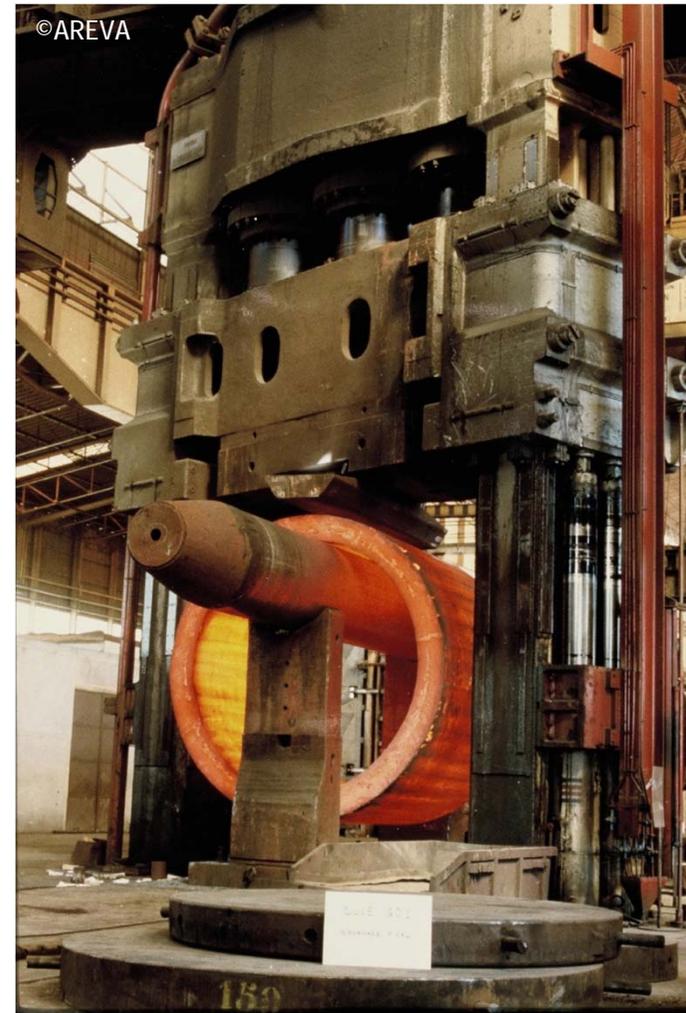
❑ Fabrication - Gamme forgeage virole de cœur cuve



a, Ségrégations dans un lingot ; b, Opération de bigornage d'une virole 900 MWe ; c, Gamme de forge moyenne virole C - 900 MWe.

❖ Conception et fabrication

❑ Fabrication - Gamme forgeage virole de cœur cuve



❖ Conception et fabrication

❑ Fabrication - Corps de cuve



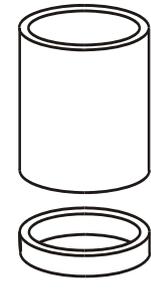
©AREVA

❖ Conception et fabrication

❑ Fabrication - Contrôles de fabrication

▪ Contrôles des pièces élémentaires (RCCM tome 2)

- Contrôles des surfaces
- Contrôles de compacité (ultrasons)
- Analyses chimiques et mécaniques



▪ Contrôles des soudures d'assemblages et des revêtements (RCCM Tome IV)

- Contrôles des surfaces avant soudage
- Contrôles des surfaces après soudage
- Contrôles de compacité (ultrasons / radiographie)

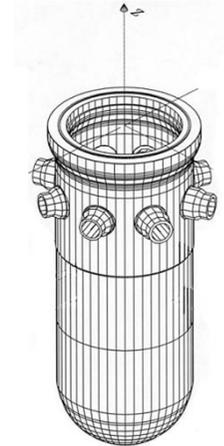
▪ Test global en fin de fabrication (épreuve hydraulique)

❖ Conception et fabrication

❑ Défauts de fabrication présents sur certaines cuves EDF

- Défauts liés aux revêtements par soudage (cf note IRSN de septembre 2012)
 - DSR (fissuration à froid) Hauteur max : 10,3 mm
 - Viroles de cœur : 8 cuves / \approx 30 DSR
 - DIDR (fissuration au réchauffage) H max 3-4 mm

- Défauts DDH ? (type Tihange 2 - Doel 3)
 - A priori non (cf note IRSN de septembre 2012)
 - Confirmé par des examens complémentaires



IRRADIATION

- ❖ Effets de l'irradiation
- ❖ Prise en compte
- ❖ Programme surveillance Irradiation(PSI)

❖ IRRADIATION - Effets de l'irradiation

❑ Dommages d'irradiation

- ❑ Amas de lacunes et d'interstitiels
- ❑ Complexes cuivre-lacunes
- ❑ Amas d'atomes de solutés (Cu, Ni, ...)

} Evolution microstructurales

❑ Facteurs prédominants

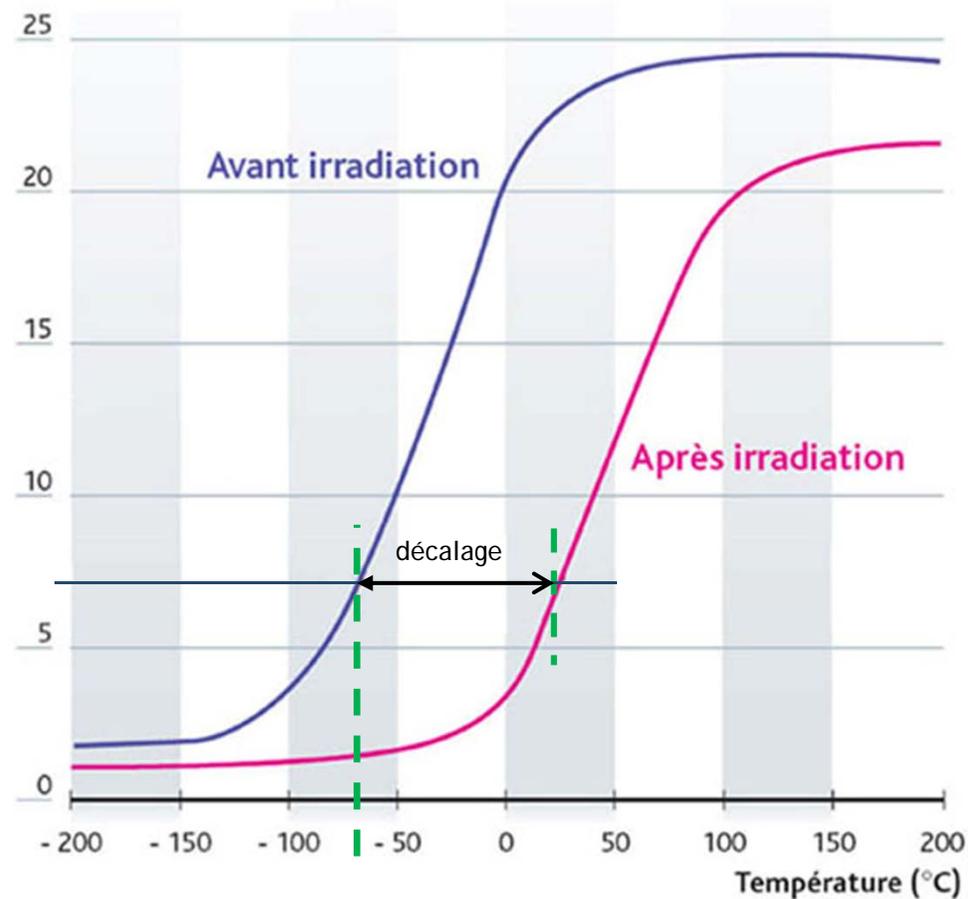
- Composition chimique (Cu, Ni, P)
- Quantité de neutrons reçus par l'acier (fluence)
- Température

❑ Effets

- Augmentation de la limite d'élasticité, durcissement
- Décalage de la température de transition (fragilisation)

❖ IRRADIATION - Effets de l'irradiation

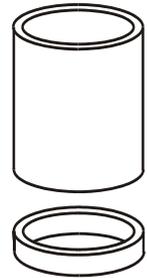
❑ Température de transition - fragilisation



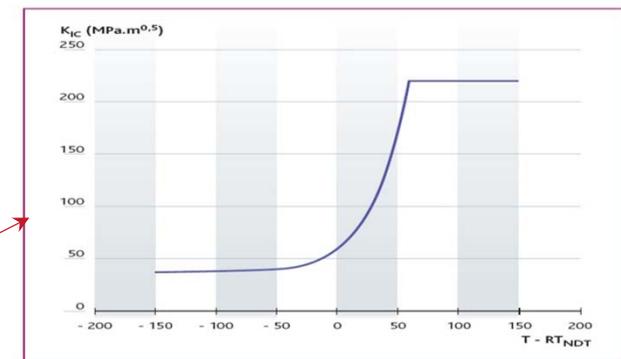
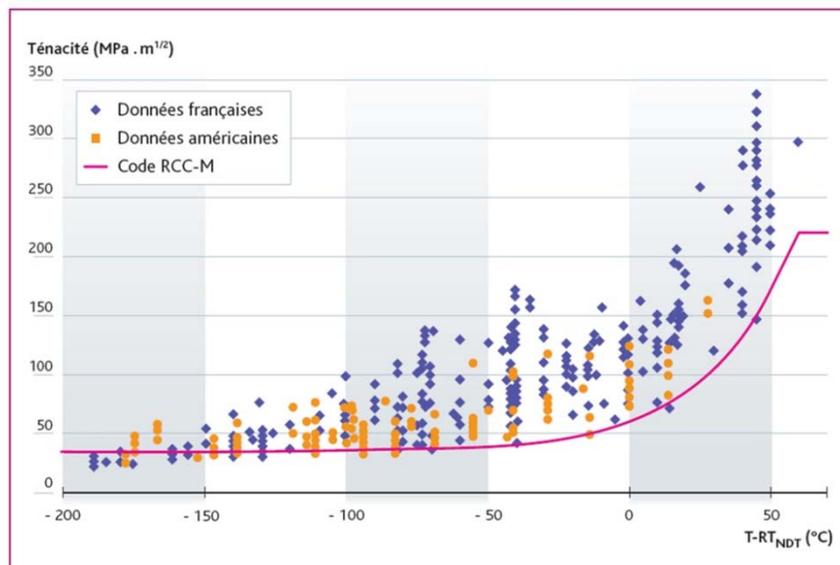
❖ IRRADIATION - Prise en compte de l'irradiation

❑ Définition et détermination d'une température de transition

Mesurée lors de la fabrication dans la couronne d'essais des viroles de cœur : RT_{NDT}



❑ Connaissance des caractéristiques par rapport à RT_{NDT} (Courbe de référence)



Courbe codifiée RCCM

❖ IRRADIATION - Prise en compte de l'irradiation

❑ Estimation de la fragilisation due à l'irradiation (ΔRT_{NDT})

Formule empirique dite de Fragilisation d'Irradation Supérieure (FIS)

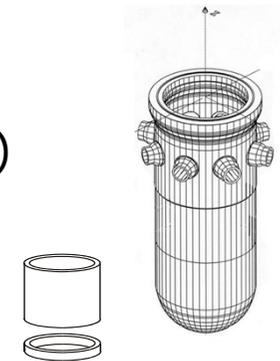
$$\Delta RT_{NDT} = f(\text{chimie}) \cdot \Phi^n$$

❑ Détermination des caractéristiques à l'état irradié

Emploi de la courbe de référence avec $RT_{NDT} = RT_{NDT \text{ ini}} + \Delta RT_{NDT}$

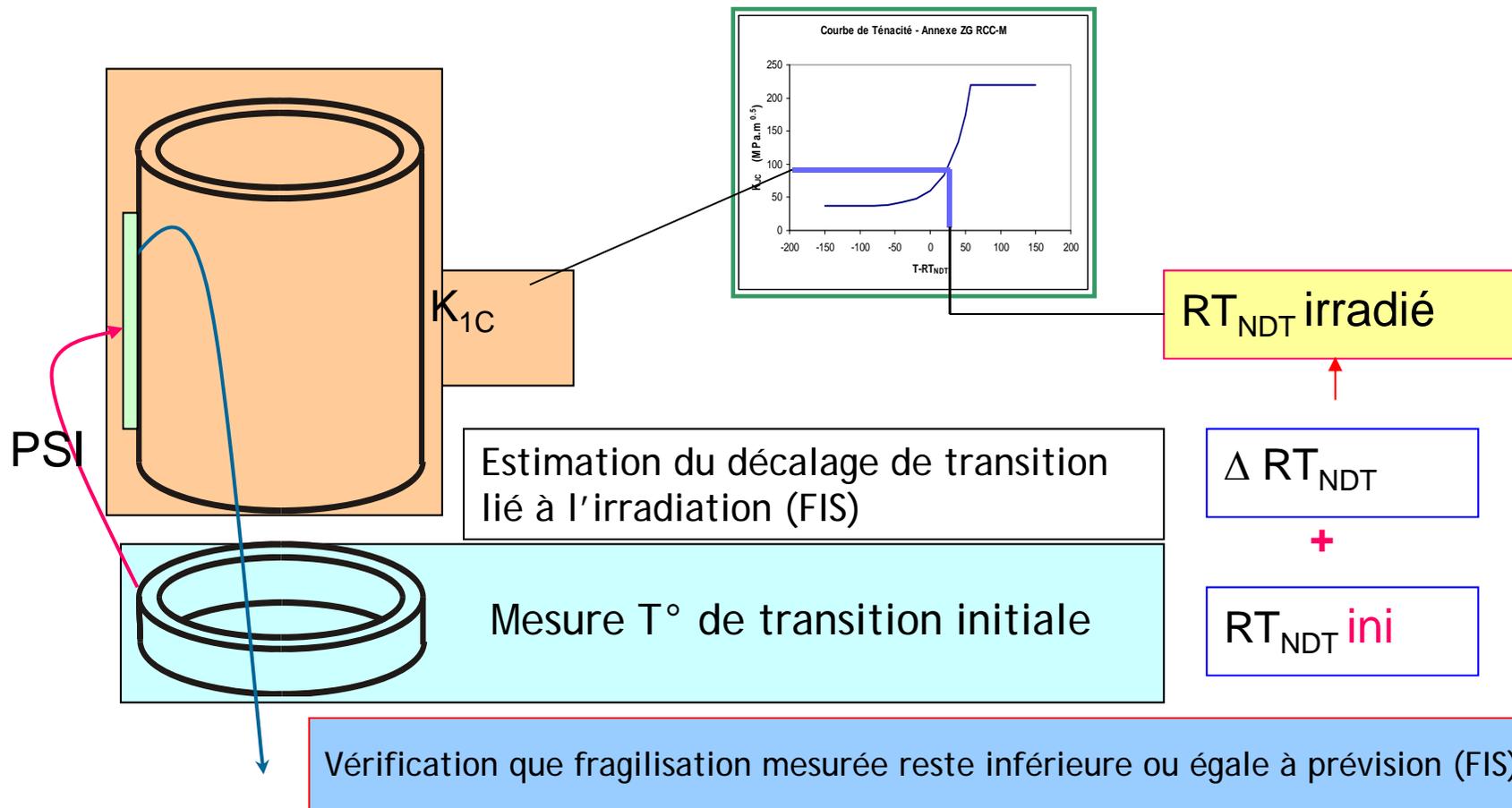
❑ Comparaison des fragilisation estimée et réelles

Grâce au programme de surveillance de l'irradiation (PSI) prévu dès la conception des premières centrales



❖ IRRADIATION - Prise en compte de l'irradiation

□ Résumé



❖ IRRADIATION - PSI -

❑ Emplacement Capsules du PSI

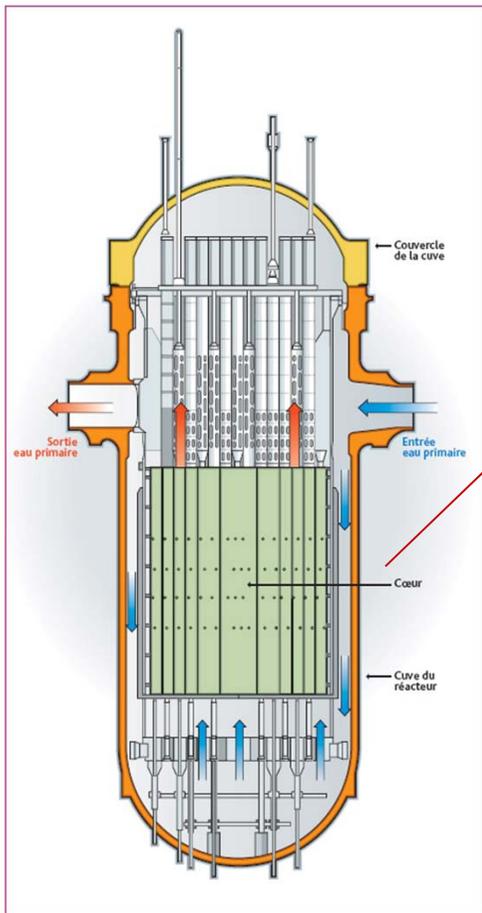
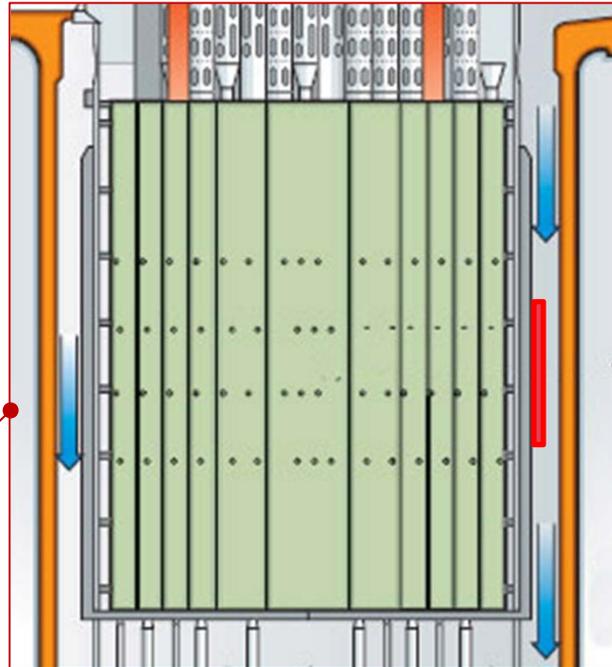
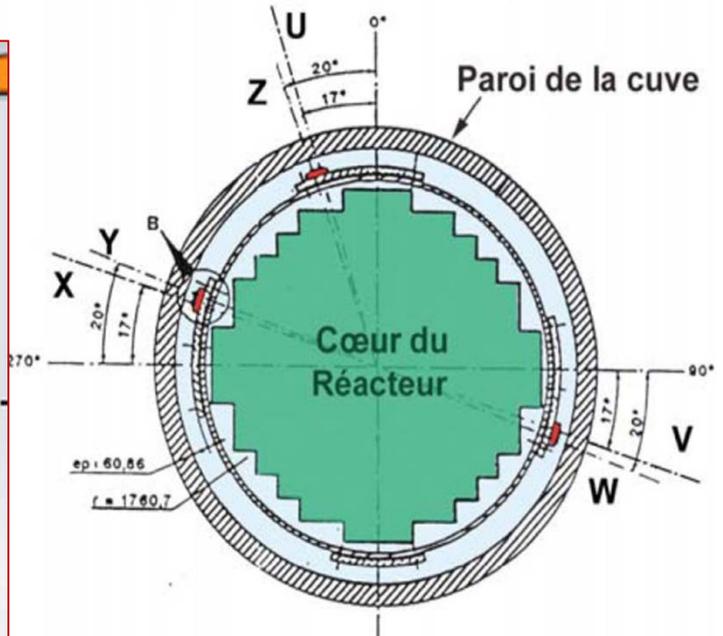


Figure 1 : Coupe de la cuve d'un réacteur de 900 MWe.



Le PSI permet une anticipation de l'évolution des propriétés de l'acier de cuve



CALENDRIER DE RETRAIT (source EDF)

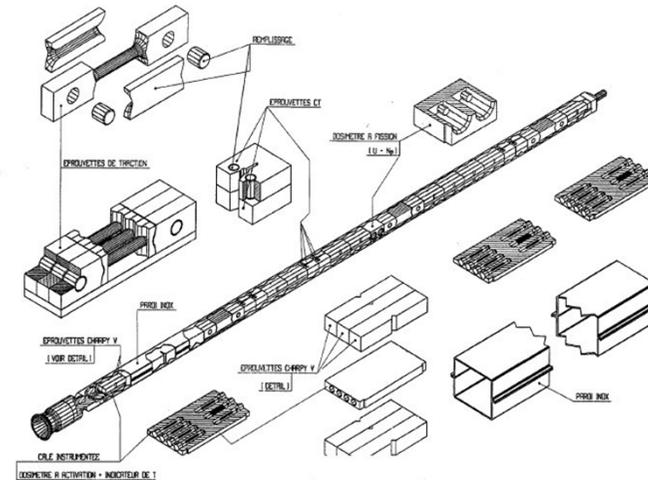
Capsules cuves 900 MWe CPY							
Repères des capsules	NI	U	V	Z	Y	W*	X*
Temps de séjour en réacteur (an)	0	4	7	9	14		
Temps équivalent cuve (an)		11,2	19,5	28,1	39,1		

* Capsules de réserve en cours d'insertion en cuve.

❖ IRRADIATION - PSI -

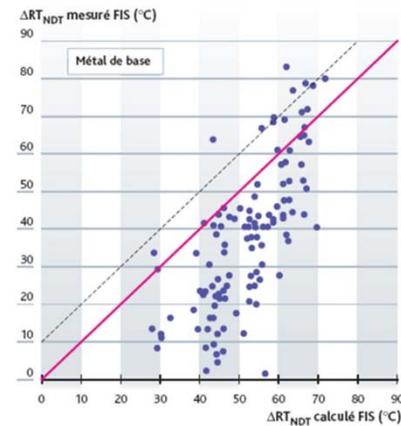
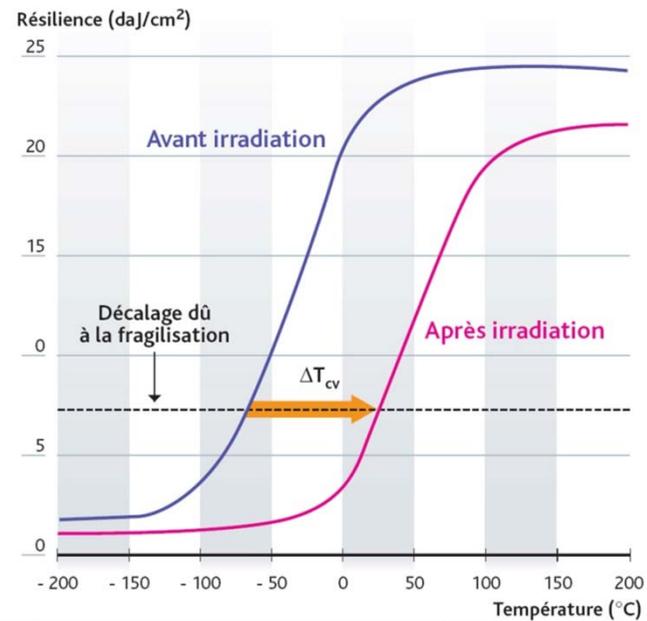
❑ Contenu des Capsules du PSI

- ❑ Espace utile limité
- ❑ Petites éprouvettes du matériaux de viroles et de soudures
 - Plusieurs dizaines d'éprouvettes KCV
 - Une dizaine d'éprouvettes de traction
 - Quelques éprouvettes de mécanique de la rupture
 - Des dosimètres
 - Des indicateurs de températures



❖ IRRADIATION - PSI -

❑ Exploitation des capsules



Situation 2005
(FIS 83)

2009 : Nouvelle formule de prévision de la fragilisation prenant en compte les résultats du PSI.
Examen par l'IRSN/ASN en 2010.
Demandes de compléments de justification (en cours d'analyse)

INSPECTION EN SERVICE DES CUVES



❖ INSPECTION EN SERVICE DES CUVES

❑ Dispositions réglementaires

- ❑ Arrêté du 10 novembre 1999

❑ Périodicité

- ❑ Lors des visites décennales
- ❑ Tricastin 1 : tous les 5 ans

❑ Nature

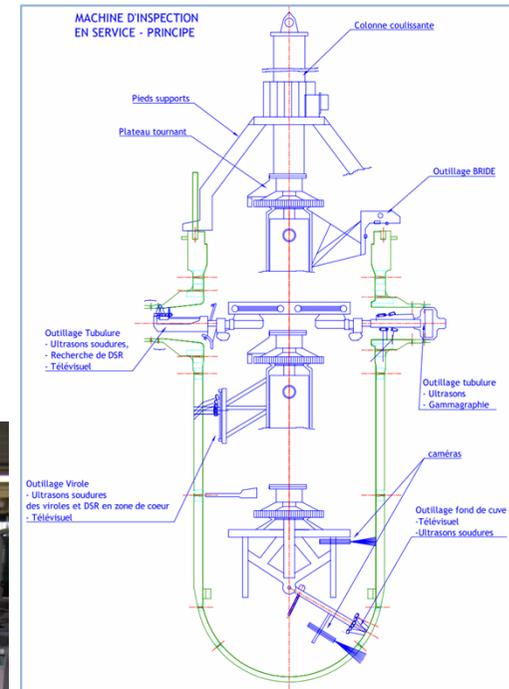
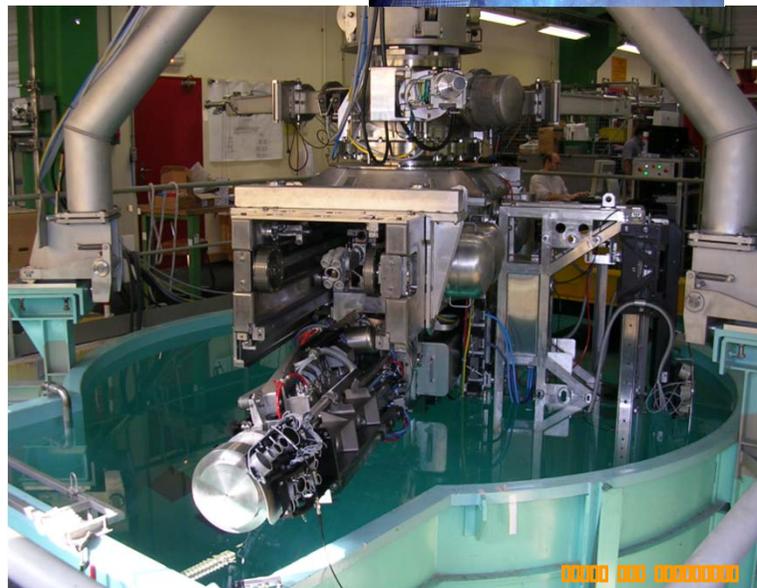
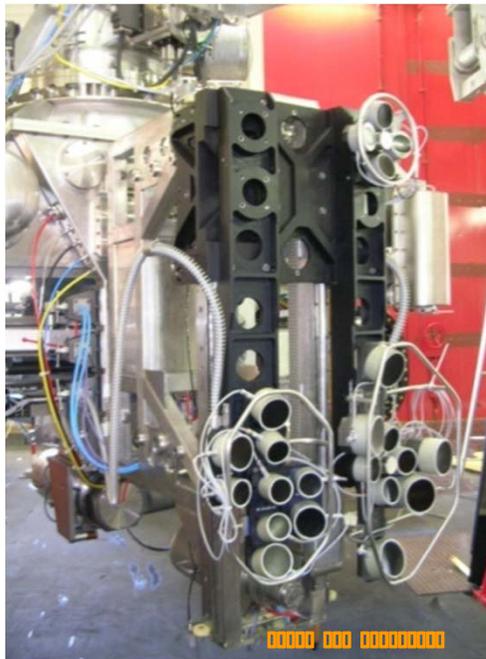
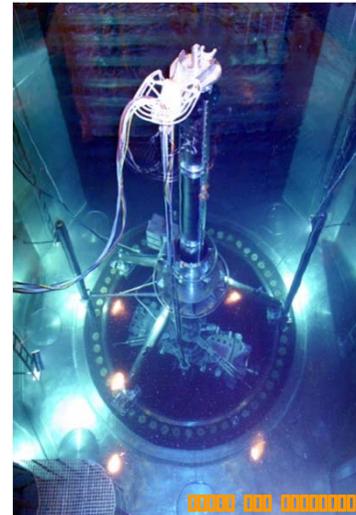
- ❑ Examen télévisuel 100% surface interne
- ❑ Contrôle US 100% zone de cœur (recherche DSR sur 25 mm profondeur)
- ❑ Contrôles US 100% soudures viroles de cœur sur toute l'épaisseur
- ❑ Contrôles 100% des soudures de liaisons avec les tuyauteries primaires.

❑ Epreuve Hydraulique Règlementaire

❖ INSPECTION EN SERVICE DES CUVES

❑ Outillage

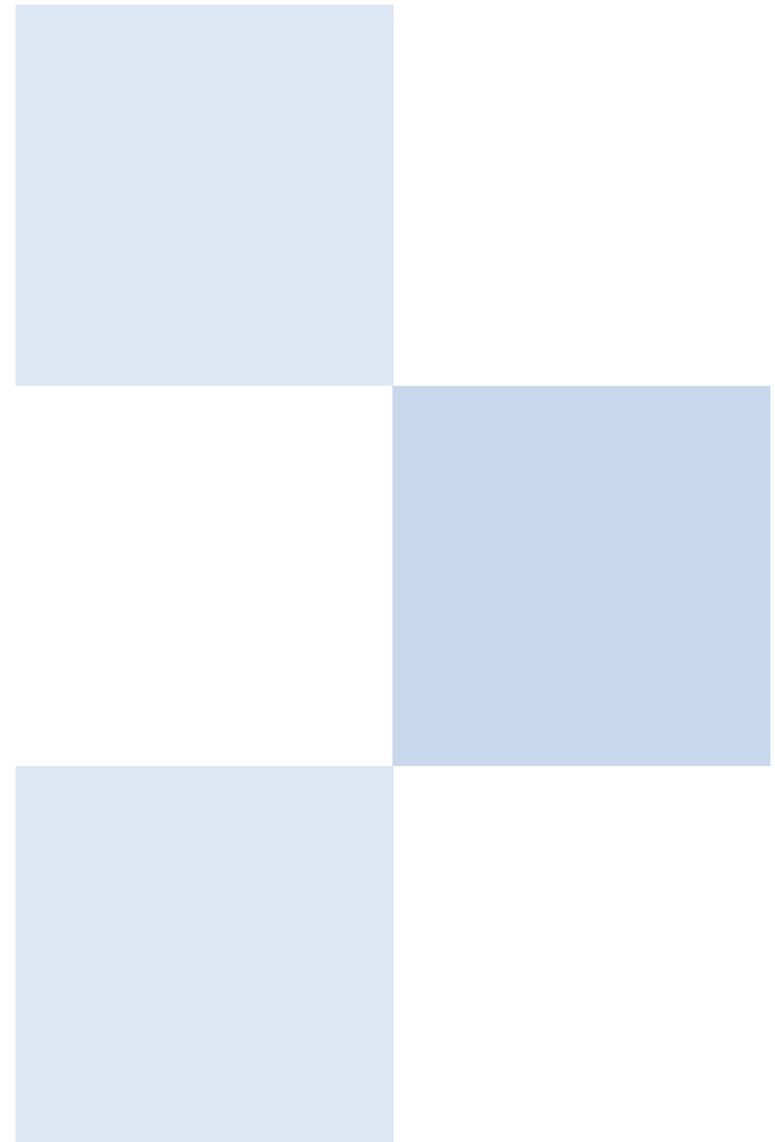
❑ Machine spécialisée



IMPACT

DOEL 3 - TIHANGE 2

EN FRANCE

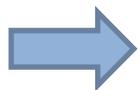
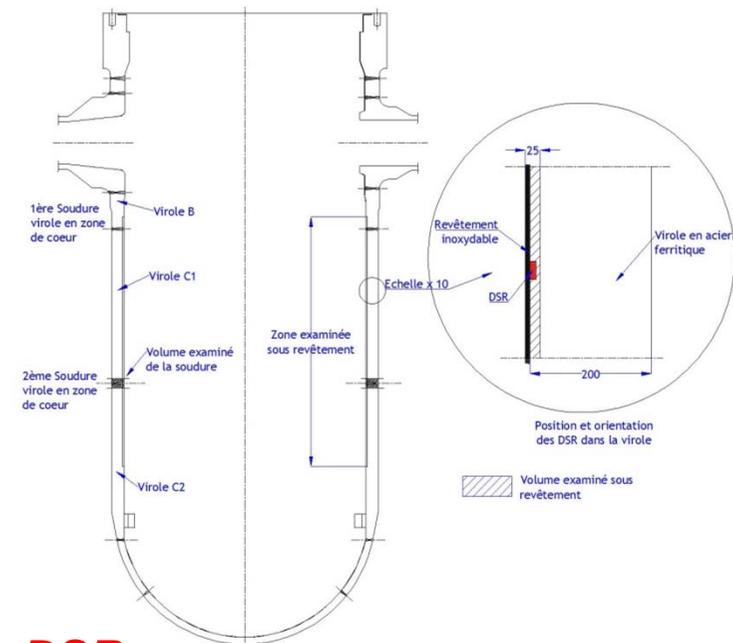
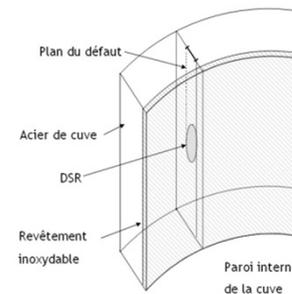
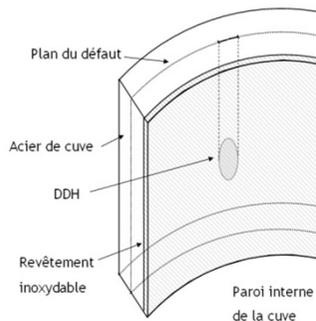


❖ IMPACT DOEL 3-TIHANGE 2 EN FRANCE

DOEL 3 : 3^{ème} visite décennale (juin 2012)

- ❑ **Procédure ultrasonore de contrôle de la cuve**
 - ❑ Identique à celle utilisée en France
 - ❑ Appliquée pour la 1^{ère} fois à DOEL 3 hors des zones soudées
 - ❑ Recherche de DSR similaires à ceux de Tricastin 1

- ❑ **Découverte de défauts**
 - ❑ en grand nombre
 - ❑ d'orientation quasi-laminaire
 - ❑ groupés dans des zones de ségrégation



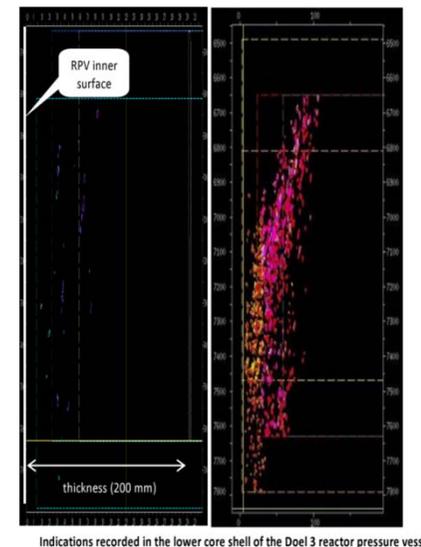
Défauts dus à l'hydrogène (DDH), pas de DSR

❖ IMPACT DOEL 3-TIHANGE 2 EN FRANCE

DOEL 3 : 3^{ème} visite décennale (juin 2012)

Extraits du rapport public “*Doel 3 and Tihange 2 final evaluation report*” de la FANC

DOEL 3	Composant	TIHANGE 2
3	RVH flange	5
2	RPV flange	19
11	Virole porte tubulure	0
857	Virole supérieure	1931
7205	Virole inférieure	80
71	Anneau de transition	0
8149	Total	2035



➔ Les DDH sont des fissures non débouchantes présentes à l'intérieur de la matière.

❖ IMPACT DOEL 3-TIHANGE 2 EN FRANCE

❑ *Suite à la découverte de défauts de type DDH dans la cuve de DOEL3, EDF a lancé 3 type d'actions*

1. Relecture des rapports de fabrication

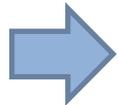
- Taux d'hydrogène H₂ du lingot ?
- Caractéristiques du traitement thermique appliqué ?
- Relecture des rapports de contrôles ultra-sonores de fin de fabrication

2. Relecture des contrôles ultra-sonores réalisés en zone de cœur tous les 10 ans

- Capable de détecter des DDH sur 80 mm d'épaisseur
- ont détectés les DDH de la cuve de DOEL3
- 34 cuves revues à ce jour : RAS

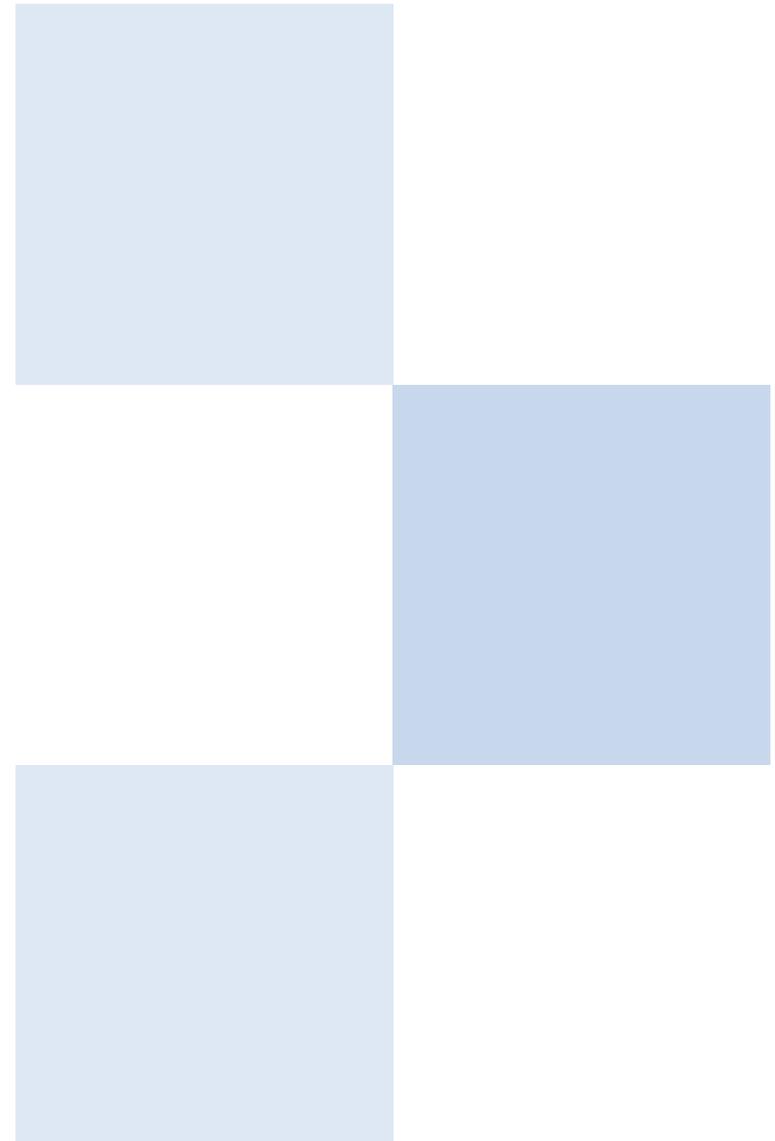
3. Nouvel examens ultrasonore

- Recherche de DDH sur toute l'épaisseur ;
- 5 cuves examinées lors des arrêts décennaux



Aucune anomalie (action 1)
Aucun DDH détecté (actions 2 et 3)

TENUE EN SERVICE DES CUVES



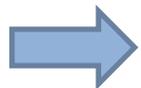
❖ TENUE EN SERVICE DES CUVES

□ Dispositions réglementaires

- Arrêté du 10 novembre 1999 (surveillance et exploitation)

□ La réglementation en vigueur impose à l'exploitant :

- d'identifier les transitoires thermo hydrauliques sollicitant la cuve
- de prendre des mesures afin de connaître l'effet du vieillissement sur les propriétés des matériaux
- de mettre en œuvre des moyens lui permettant de détecter au plus tôt des défauts préjudiciables à l'intégrité de la cuve
- d'éliminer toute fissure détectée ou – en cas d'impossibilité – **d'apporter une justification spécifique appropriée au maintien en l'état d'un tel type de défaut.**



Tenue mécanique à la rupture en présence d'un défaut plan (fissure)

- *défaut postulé ou détecté dans l'acier de cuve ou le revêtement*
- *en prenant en compte la fragilisation par irradiation de la cuve*
- *pour toutes les situations du dossier de dimensionnement (incidentelles et accidentelles)*

❖ TENUE EN SERVICE DES CUVES

❑ HYPOTHESES

- ❑ Fluence prévisionnelle à 40 ans : Il s'agit d'une **estimation haute** qui conduit à la **fragilisation maximale** de l'acier de cuve
- ❑ Toutes les situations incidentelles et accidentelles sont analysées
- ❑ Prise en compte d'un coefficient de sécurité compris entre 1,2 et 2 selon la situation, conformément à la réglementation (arrêté du 10/11/1999).

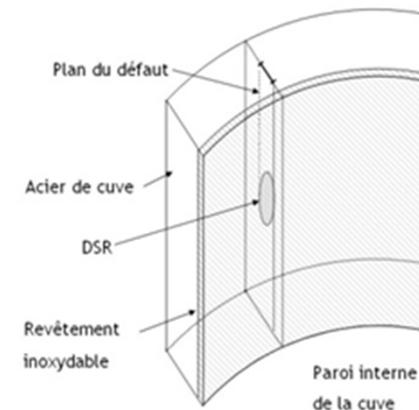
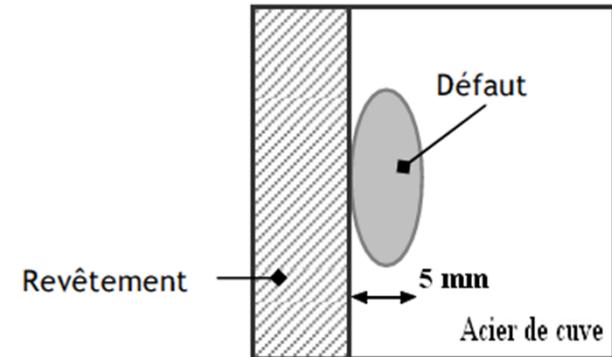
❖ TENUE EN SERVICE DES CUVES

❑ DOSSIER GÉNÉRIQUE

❑ Défaut postulé

- ❑ Défaut plan, de forme elliptique
- ❑ Plus grand défaut non détectable par les contrôles
- ❑ DSR : 5 mm x 25 mm, avec les sollicitations les plus pénalisantes (transitoire pénalisant appliqué au point chaud de la cuve la plus fragilisée)

➔ *L'objectif est d'apporter la démonstration que tous les défauts qui pourraient être présents ne remettent pas en cause la tenue mécanique de la cuve.*



❖ TENUE EN SERVICE DES CUVES

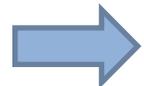
❑ DOSSIER SPECIFIQUE

❑ Défaits détectés lors des contrôles ultra-sons (défaits réels)

- ❑ Une trentaine de DSR répartis sur 8 cuves du palier 900 MWe
 - ❑ Une vingtaine sur la cuve de la centrale de Tricastin 1
 - ❑ Taille maximale de 11 mm, incertitude comprise
- ❑ Quelques DSR sur des cuves du palier 1300 MWe

❑ Localisation définie

- ❑ valeur de la fluence locale retenue
- ❑ chargement local retenu



L'objectif est d'apporter la démonstration que tous les défauts qui sont présents ne remettent pas en cause la tenue mécanique de la cuve. Ces défaut sont suivis et aucune évolution de ces défauts n'a été détectée à ce jour.

❖ TENUE EN SERVICE DES CUVES

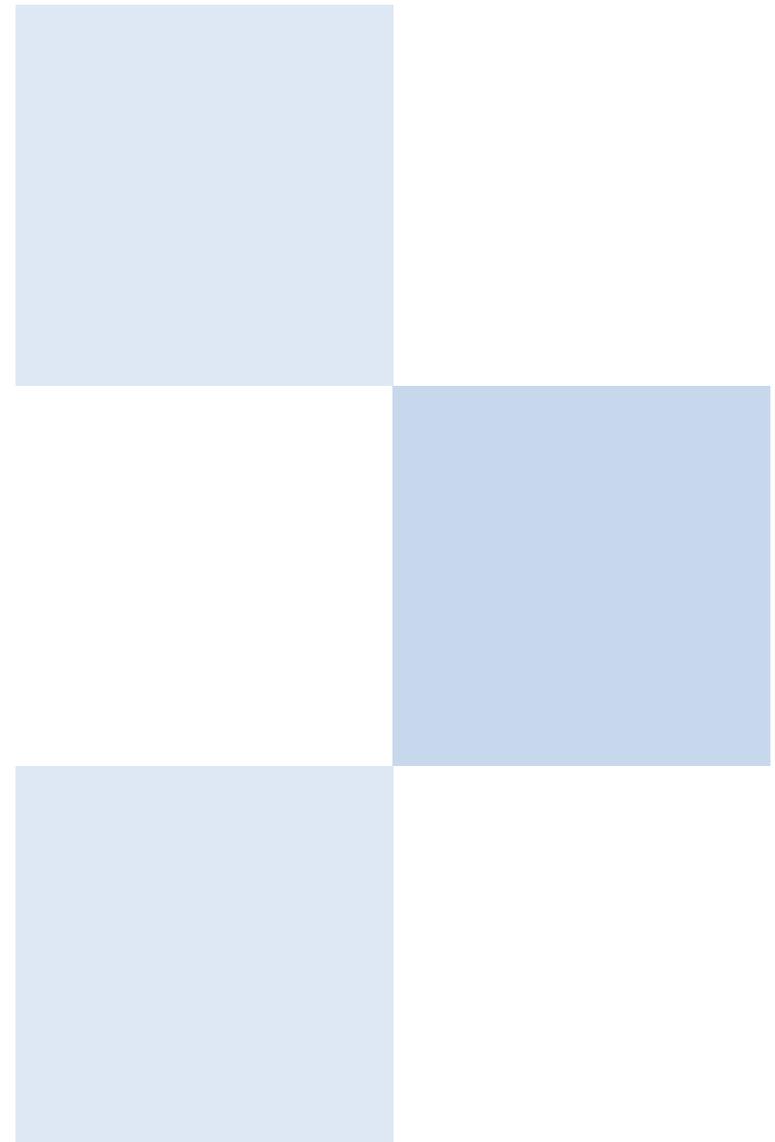
- ❑ La concentration de contrainte en pointe du défaut doit être inférieure à la ténacité de l'acier de cuve :

$$K(\text{coefficient de sécurité} \times \text{chargement, taille de défaut}) < K_{IC}(\text{acier de cuve irradié})$$

❑ Résultats

- ❑ Les résultats les plus pénalisants sont obtenus pour des transitoires accidentels (petites brèches primaires 2" à 3") où la cuve subit un choc froid (traction en paroi interne) provenant de l'injection de sécurité (7°C) alors qu'elle est encore fortement pressurisée

CONCLUSIONS



❖ CONCLUSIONS

❑ Tenue des cuves 900 MWe

- ❑ Le dossier 40 ans (VD4) a été instruit en 2010 par l'IRSN et l'ASN et a été approuvé par l'ASN moyennant :

- ❑ Des contrôles ultrasonores supplémentaires à mi-parcours pour la cuve de Tricastin 1 (VD3 + 5 ans)
- ❑ De maintenir l'eau de l'injection de sûreté à une température de 20°C (limitation des chocs froids éventuels) sur les tranches de :

Tricastin 1 - Saint Laurent B1 - Fessenheim 2

- ❑ Au-delà de 40 ans : transmission du dossier de justification VD4+10 ans attendu fin 2014.

❑ Tenue des cuves 1300 MWe

- ❑ Dossier reçu début 2014
- ❑ En cours d'analyse par l'IRSN et l'ASN