

The logo for IRSN, featuring the letters 'IRSN' in a bold, sans-serif font. The 'I', 'R', and 'S' are red, while the 'N' is blue.

INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Les enceintes de confinement des REP 900 MWe

Réunion ANCCLI du 21 janvier 2015

PLAN DE LA PRESENTATION

- INTRODUCTION
- PRINCIPES DE SURETE
- CONCEPTION
- REALISATION
- LA SURVEILLANCE DES ENCEINTES
- LES ÉPREUVES DES ENCEINTES
- LES INSPECTIONS DE L'ASN
- PRISE EN COMPTE DES ACCIDENTS GRAVES
- VIEILLISSEMENT DES ENCEINTES
- PATHOLOGIES DES ENCEINTES
- CONCLUSIONS

INTRODUCTION

Identification de l'enceinte de confinement d'un réacteur nucléaire à eau pressurisée (REP)



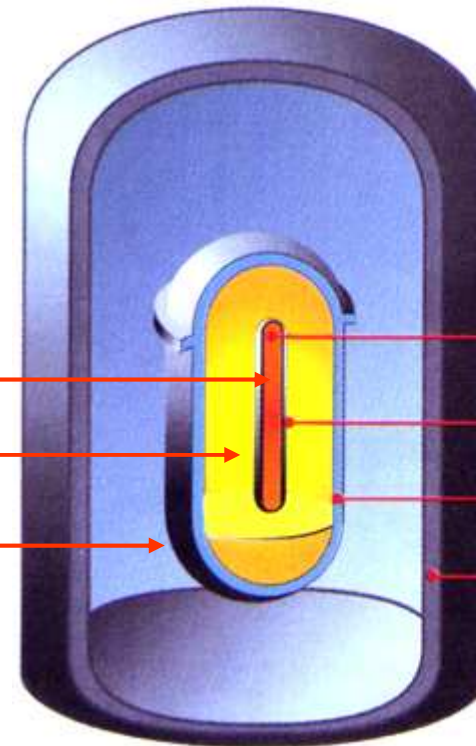
PRINCIPES DE SURETE

- Le bâtiment du réacteur abrite les éléments du circuit primaire
>> risque de dispersion des matières radioactives dans l'environnement
- Pour limiter ces risques, mise en œuvre de trois barrières physiques :
 - indépendantes
 - résistantes
 - étanches

contrôler la réactivité

contrôler le refroidissement

contrôler le confinement des produits
radioactifs et chimiques



Les 3 barrières




1. gaine du
combustible

2. circuit
primaire

3. enceinte de
confinement

L'enceinte de confinement est l'ultime barrière de protection de
l'environnement

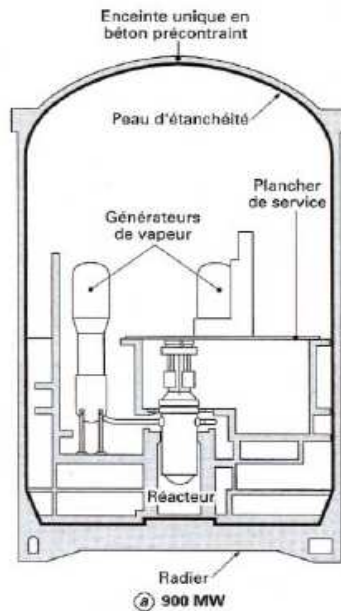
PRINCIPES DE SURETE

- ❑ **Fonctions de sûreté associées aux enceintes de confinement**
 - Confinement des produits radioactifs
 - Protection contre les agressions internes et externes
 - Supportage des matériels
 - Protection contre les rayonnements
- 
- ❑ **Exigences de sûreté**
 - Etanchéité, rétention pour respecter les critères de rejet
 - Résistance et capacité de supportage

CONCEPTION DES ENCEINTES DE CONFINEMENT

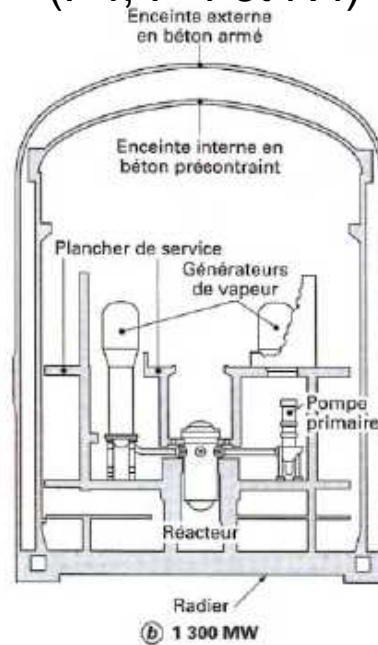
Les trois types d'enceintes du parc EDF

Paliers 900 MWe
(CP0, CP1 et CP2)



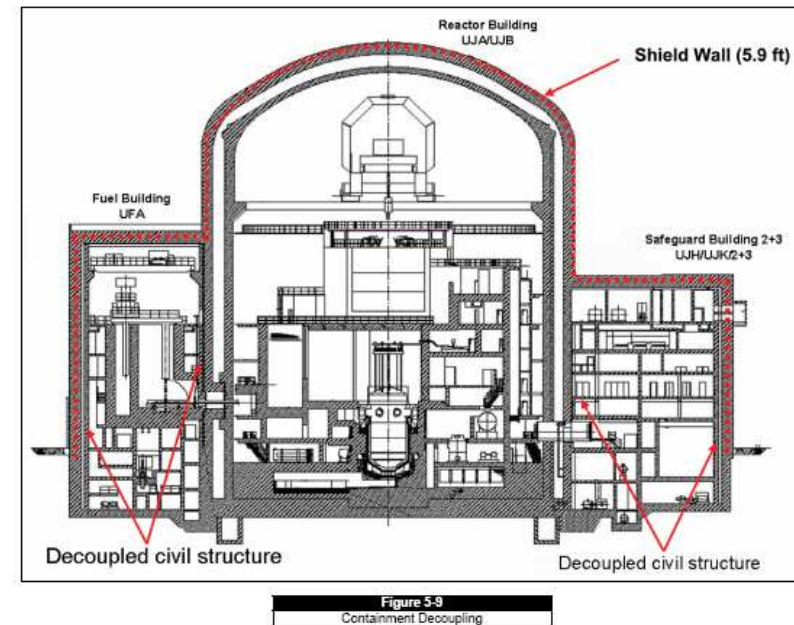
Enceinte à simple paroi avec peau

Paliers 1300 MWe
et 1450 MWe
(P4, P'4 et N4)



Enceinte à double paroi sans peau

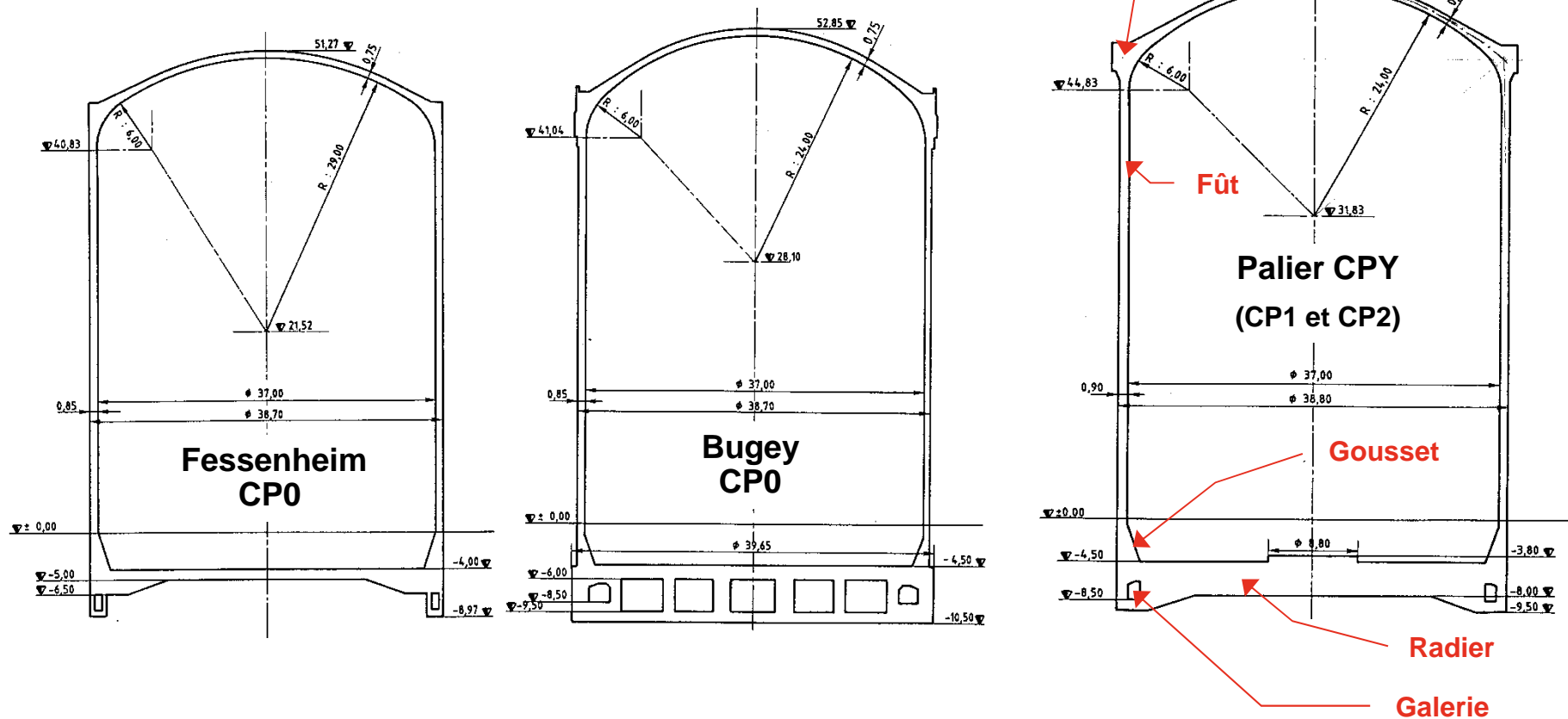
Projet EPR



EPR

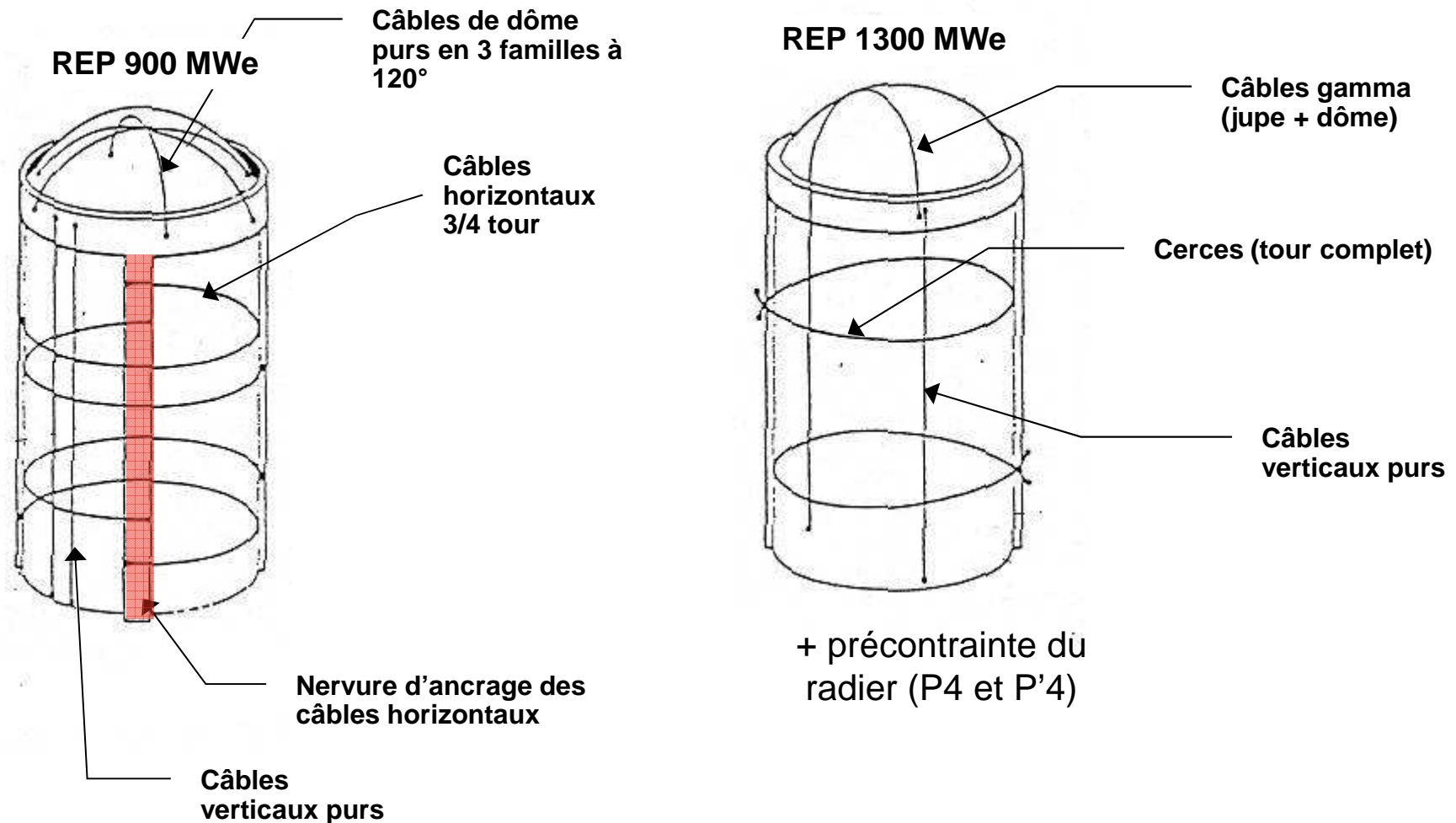
Enceinte à double paroi avec peau

CONCEPTION: Coupes types et terminologie



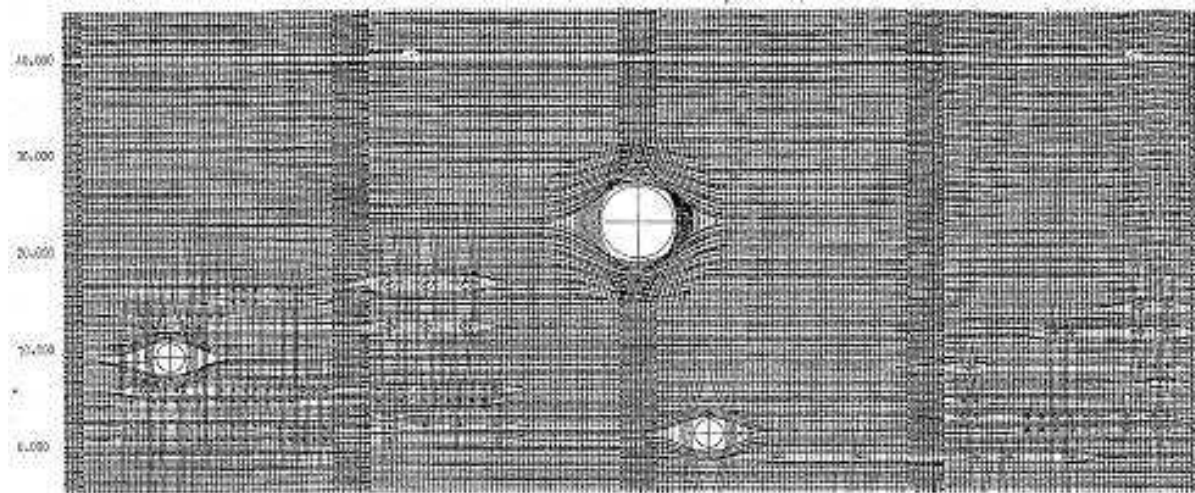
CONCEPTION: Principes de câblage des enceintes

Les enceintes comportent un système de précontrainte, formé de 300 à 600 câbles selon le type d'enceinte.

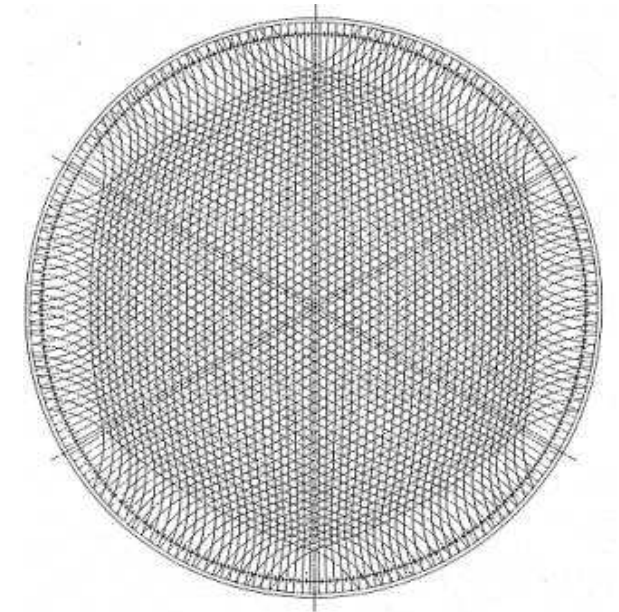


CONCEPTION: Principes de câblage des enceintes

Vue développée du fût d'une enceinte 900 (4 nervures, câbles 19 T15)



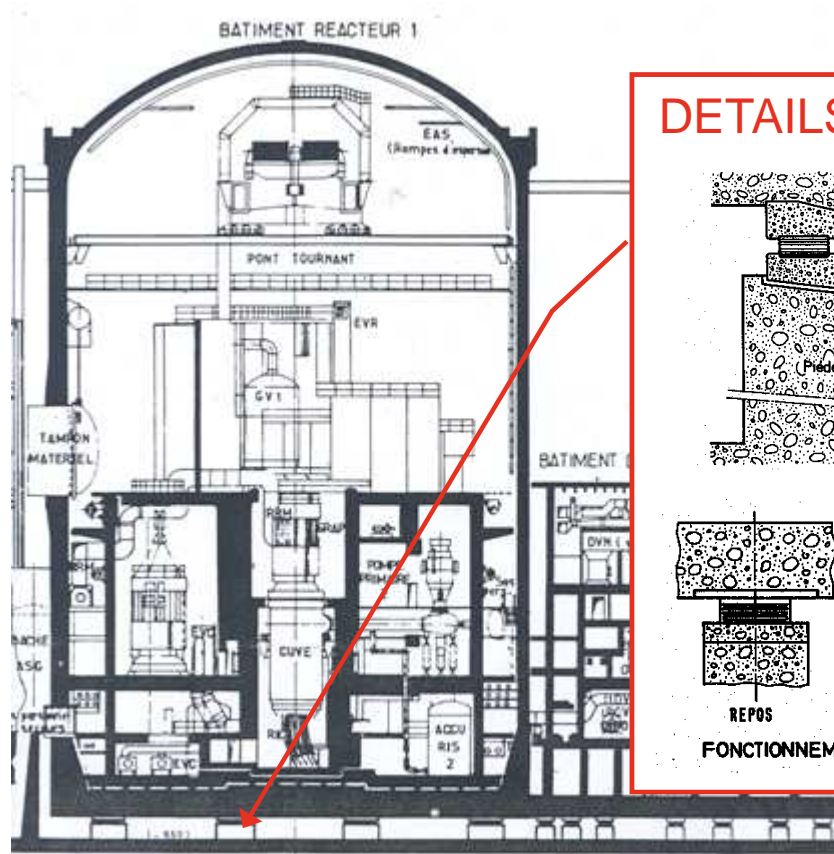
Vue en plan du dôme d'une enceinte 900 MWe



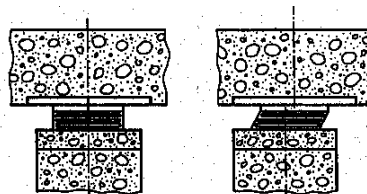
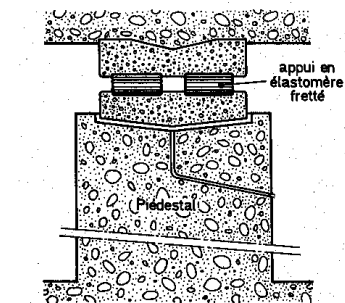
CONCEPTION dans le palier CP2, un cas particulier : **CRUAS**

- Pression d'accident: 5 bars au lieu de 4 bars
- Enceintes épaisseur 1,10 m (0,90 m CP1)
- Ilots nucléaires sur appuis parasismiques

Vue en élévation de l'îlot nucléaire

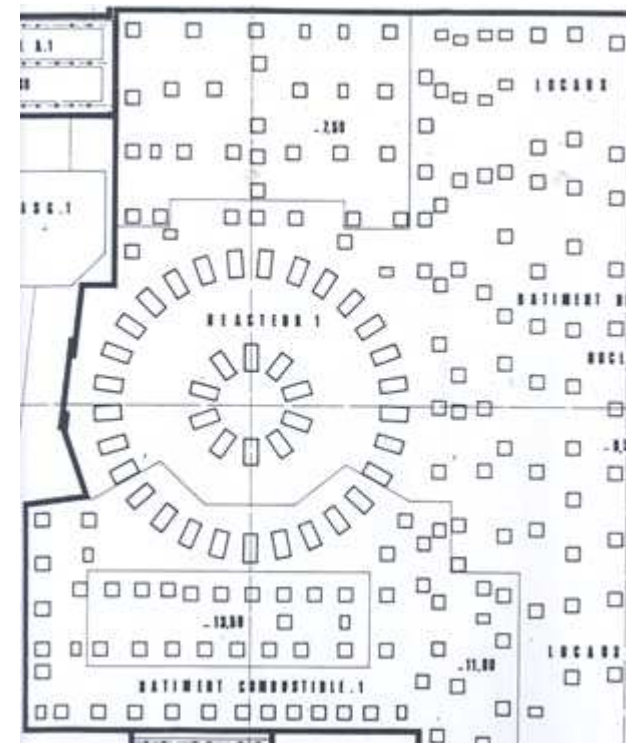


DETAILS APPUIS



FONCTIONNEMENT des APPUIS

Vue en plan de l'implantation des appuis en élastomère fretté



CONCEPTION

Exigences de sûreté attribuées aux enceintes

➤ **Fonction de confinement**

➔ étanchéité aux gaz + résistance mécanique

- Étanchéité assurée par la peau métallique
- Résistance assurée par la paroi en béton précontraint

➤ **Fonction de protection contre les rayonnements ionisants**

En outre, la résistance aux **agressions externes** est assurée par la paroi en béton précontraint.

CONCEPTION

Deux phases:

- **pré-dimensionnement, qui fixe le coffrage et la précontrainte d'une enceinte**
 - **dimensionnement, qui consiste en un calcul de son ferrailage passif et en une vérification des contraintes dans le béton et les câbles.**
-
- Le comportement mécanique de l'enceinte est analysé à l'aide de modèles simples puis de logiciels de calcul
 - Approche déterministe par Etats limites de service (ELS) pour la réversibilité et par Etats limites ultimes (ELU) pour les marges à la rupture
 - Combinaisons dimensionnantes : APRP, épreuve, séisme; APRP+séisme pour constituer des marges
 - Critères sur les matériaux: contraintes et/ou déformations admissibles

CONCEPTION : les traversées de l'enceinte

L'accès des matériels constitue un passage libre permettant l'introduction des composants lourds du circuit primaire constitué

- d'un orifice circulaire radial chemisé par un fourreau d'épaisseur variable et de 8m de diamètre.
- d'un fond démontable rendu solidaire du fourreau, au moyen d'une bride boulonnée munie de joints

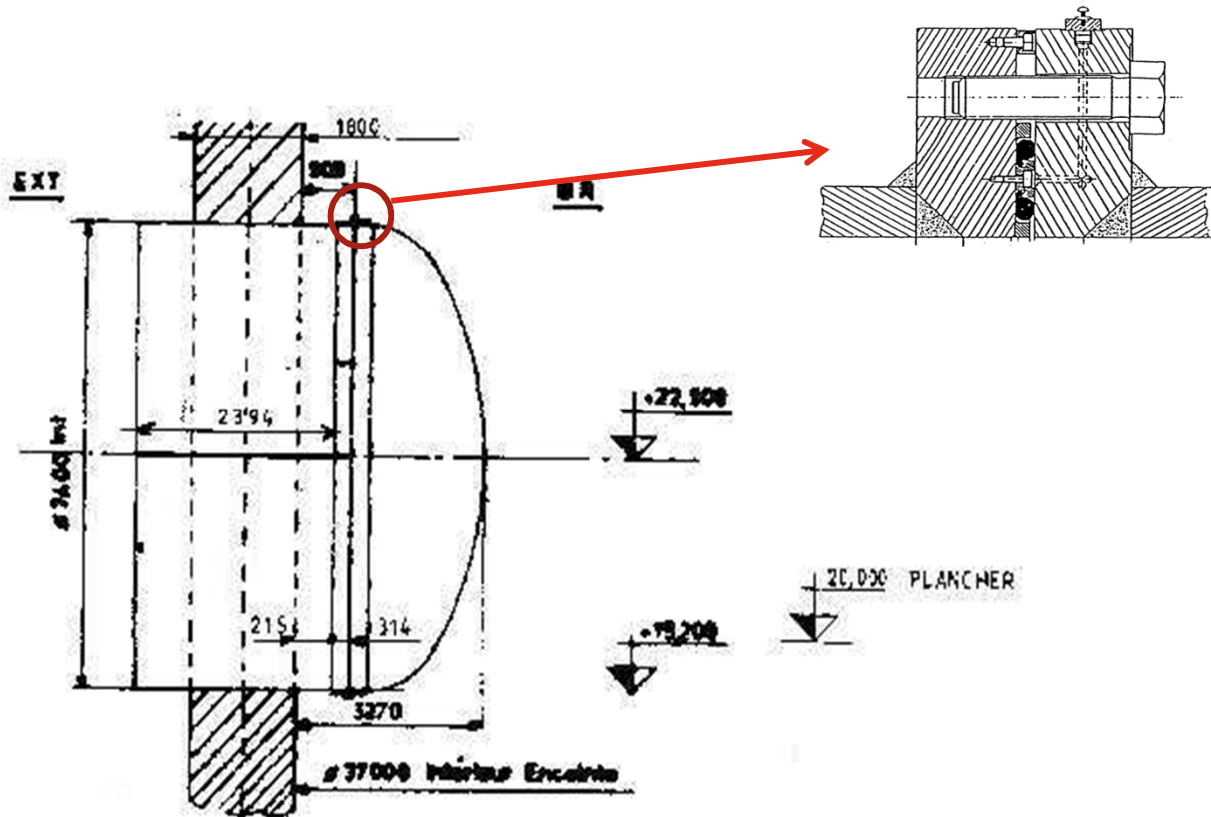
Deux sas personnel : un sas d'exploitation et un sas d'entretien

Les autres traversées permettent le passage étanche à travers la paroi de l'enceinte des :

- tuyauteries chaudes et froides
- gaines de ventilation
- conducteurs électriques
- tube de transfert, permettant d'amener le combustible du BK au BR

CONCEPTION : les traversées de l'enceinte

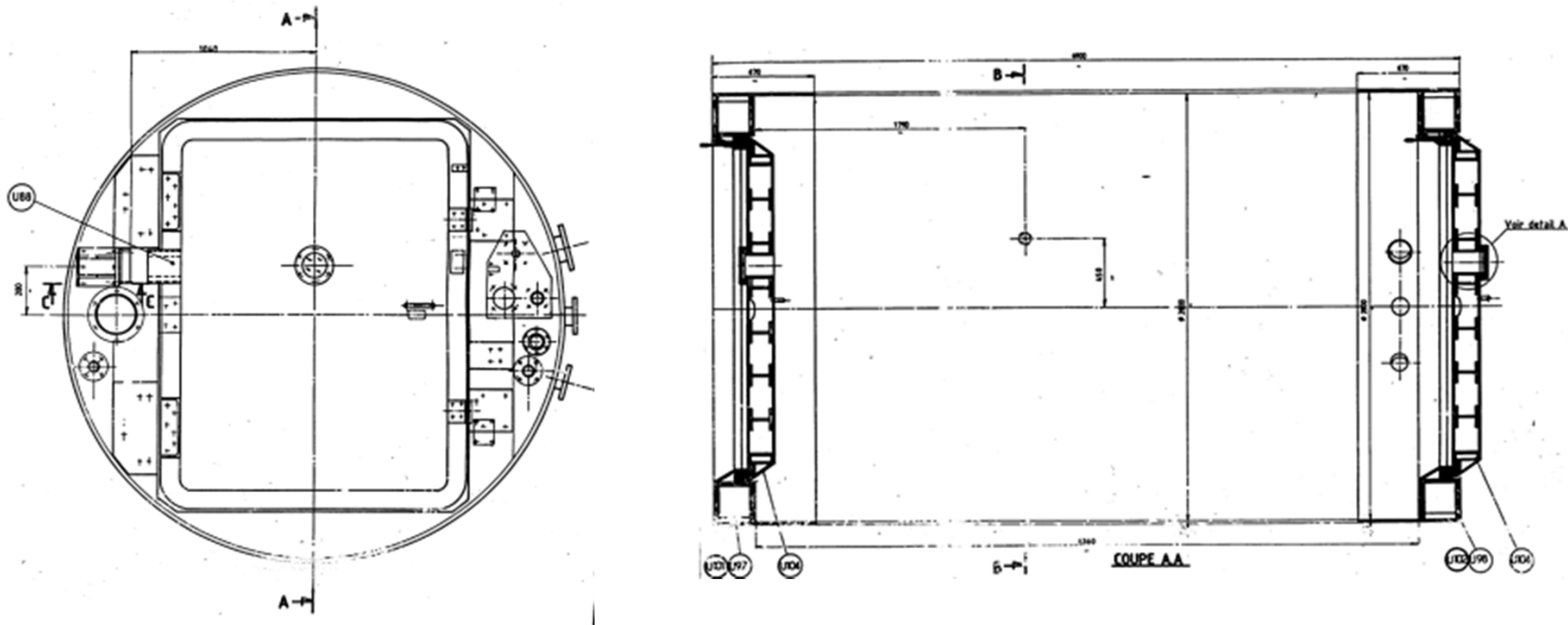
L'accès des matériels



Détail de la fermeture
par brides + joints en
élastomère

CONCEPTION : les traversées de l'enceinte

Les sas personnel



Structure en mécano-soudé équipée de joints en élastomère pour :

- les portes et les hublots (joints statiques) : base Silicone
- les arbres de commande (Joints dynamiques) : base Ethylène -Propylène ou Viton

REALISATION DES ENCEINTES

Vue d'ensemble du processus

- Coffrage, ferrailage et bétonnage du radier, du fût et du dôme
- Revêtement d'étanchéité de l'enceinte: peau métallique pour les REP 900 MWe
- Les inserts : gaines des câbles de précontrainte, fourreaux et platines
- La précontrainte : approvisionnement, mise en place et injection
- Les dispositifs d'auscultation

La construction de l'enceinte se termine par son épreuve de réception, qui permet de vérifier sa conformité, donc de confirmer a posteriori sa qualité de réalisation.

REALISATION: **points sensibles**

■ **Le choix des matériaux**

- Le béton (sable + gravier + ciment + eau + adjuvants) : résistance, maniabilité, précautions contre l'alcali-réaction, le fluage...
- Les armatures de précontrainte (faible relaxation, non sensibles à la corrosion sous contrainte) et leur coulis d'injection

■ **Le bétonnage par levées successives**

- Coffrage (la peau métallique servant de coffrage perdu)
- Ferrailage et mise en place des gaines (feuillards ou tubes)
- Coulage et serrage du béton

■ **La précontrainte: élément essentiel des enceintes**

- L'enfilage des torons dans les gaines vides
- La mise en tension au vérin (suivant un phasage approprié)
- L'injection du coulis (délai < 15j)

■ **Les zones délicates:** le gousset, l'accès des matériels et les sas, la ceinture torique, le dôme

Réalisation du radier d'une enceinte 900 MWe

Mise en place de la peau métallique sur le radier. Premières tôles du gousset.



Réalisation du fût d'une enceinte 900 MWe



Réalisation du dôme d'une enceinte 900 MWe

Une enceinte de Gravelines, après deux décennies d'exposition aux embruns...

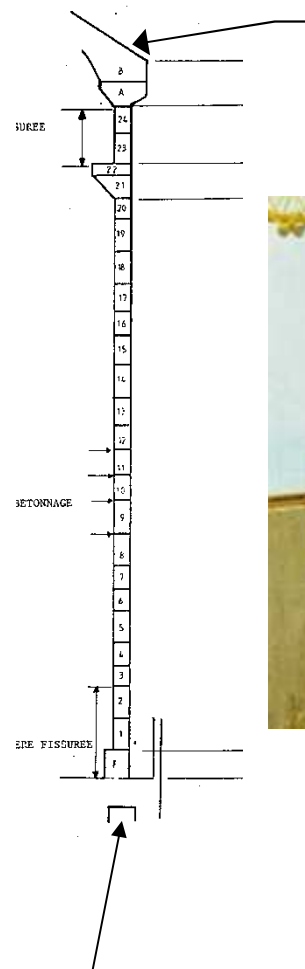
Mise en place du ferrailage dans la zone de la ceinture d'un dôme de Dampierre



Opérations de mise en tension des câbles verticaux



vérinage



En partie supérieure :
depuis la ceinture du dôme



En partie inférieure: depuis la galerie de précontrainte ou l'espace entre radiers de Cruas

SURVEILLANCE DES ENCEINTES

En tant que 3^{ème} barrière, l'enceinte de confinement est importante pour la démonstration de sûreté de la tranche.

La surveillance des enceintes comporte :

- Les épreuves décennales
- Le suivi du comportement mécanique à long terme de l'ouvrage

L'objectif est de vérifier que l'enceinte respecte ses exigences de sûreté, et reste apte à les respecter pour une durée donnée.

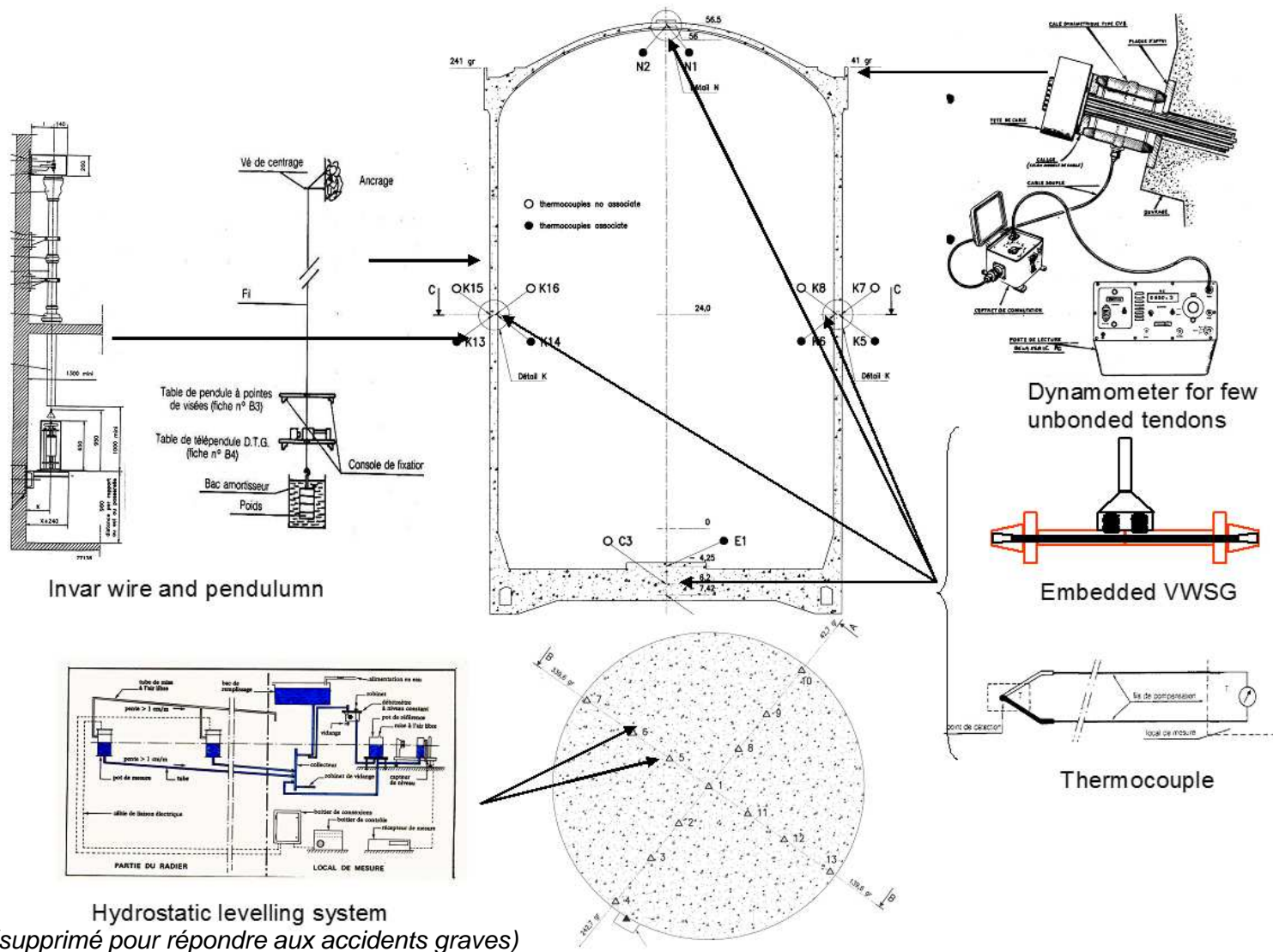
Un des moyens utilisés: le dispositif d'auscultation.

SURVEILLANCE DES ENCEINTES: le dispositif d'auscultation

L'instrumentation a pour but de suivre l'évolution du comportement mécanique lors des épreuves et au cours de la vie de l'ouvrage

Extensomètres noyés (témoins sonores)	fournissent les déformations locales du béton et permettent d'estimer le module d'élasticité du béton
Thermocouples	associés à chaque groupe d'extensomètres, ils donnent les températures dans l'épaisseur des parois
Pendules	disposés sur quatre génératrices du fût, ils permettent de mesurer la variation de rayon à trois niveaux.
Fils invar verticaux	ils permettent de mesurer la variation de longueur de la partie de l'ouvrage sur lequel ils sont installés
Dynamomètres	ils permettent de mesurer la variation de tension des câbles dans le temps (peu fiable)
Mesures topographiques	nivellement optique, nivellement hydraulique (tassements du bâtiment)

SURVEILLANCE DES ENCEINTES : le dispositif d'auscultation



Hydrostatic levelling system
(supprimé pour répondre aux accidents graves)

(du rapport « Post-tensionning methodologies », OCDE/AEN/CSNI, 2014)

LES EPREUVES DE L'ENCEINTE

■ Pourquoi ?

Faire la preuve de la résistance et de l'étanchéité de l'ouvrage, au cours d'un essai à la pression de dimensionnement :

- résistance : acquisition des données d'auscultation
- étanchéité : quantification des fuites

■ Quand ?

- à la réception du gros œuvre (essai pré-opérationnel)
- au 1^{er} rechargement, puis à chaque arrêt décennal (ou de manière anticipée si nécessité)

LES EPREUVES DE L'ENCEINTE

Exigences associées

■ Contrôle de l'étanchéité au cours de l'épreuve

- ✓ Exigence : taux de fuite $< 0,3\%/j$ (critère du DAC) de la masse de gaz contenue dans l'enceinte, dans les conditions de l'APRP
- ✓ En épreuve, on utilise un critère transposé de celui du DAC, tenant compte des incertitudes de mesure, des conditions de réalisation de l'épreuve et de provisions pour vieillissement

■ Contrôle de la résistance et prévention de la corrosion du liner

- ✓ Exigence de comportement élastique vérifiée à partir des déformations locales et d'ensemble observées, qui doivent être proportionnelles à la pression et conformes aux calculs de structure
- ✓ Exigence d'intégrité de la peau métallique vérifiée après l'essai par l'absence de dégradation visible
- ✓ Exigence d'intégrité de la paroi vérifiée au cours de l'essai par l'absence d'évolution notable des fissures à l'extrados

LES EPREUVES DE L'ENCEINTE

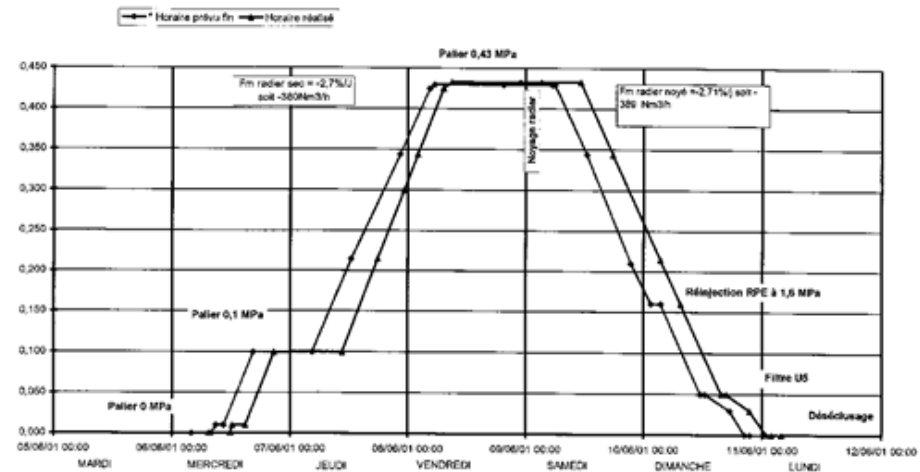
Déroulement d'une épreuve enceinte

L'épreuve dure ~1 semaine :

Préparation, gonflage, palier 1 bar, palier nominal, noyage éventuel, dégonflage.

➤ mesure globale du taux de fuite de l'enceinte en air au moyen des capteurs de pression, d'hygrométrie et de température.

➤ mesure individuelle du débit de fuite en air (ou en eau) des traversées électriques et mécaniques.



➤ mesure locale du débit de fuite en air de certaines fissures

LES EPREUVES DE L'ENCEINTE :

contrôle des traversées

Avant chaque épreuve de l'enceinte, dite essai de type A, Les traversées sont testées, avec les critères d'étanchéité suivants.

Essai de Type B

- > Traversées des câbles électriques: 1% du taux de fuite global limite requis de l'enceinte pour l'ensemble des traversées électriques
- > Joints de portes des sas personnels: 1% du taux de fuite global limite requis de l'enceinte par porte de sas
- > Joints du tampon de l'accès matériel: 1% du taux de fuite global limite requis de l'enceinte
- > Joints du fond plein du tube de transfert: 1% du taux de fuite global limite requis de l'enceinte

Essai de Type C appliqué aux traversées mécaniques : la combinaison des taux de fuite de l'ensemble des organes d'isolement soumis aux essais de type C doit rester inférieur à 50 % du taux de fuite global limite requis de l'enceinte.

LES INSPECTIONS DE L'ASN

Ces inspections permettent de contrôler, sur les 19 sites du parc :

- La qualité de l'organisation chargée du génie civil, de la relation avec les services centraux EDF
- Le respect du programme de maintenance préventive, le bilan des écarts constatés, le traitement de ces écarts (analyses de nocivité et délais de mise en conformité)
- L'état des dispositifs de mesure des déformations de l'enceinte
- L'état de la peinture de la peau métallique
- L'état des réparations effectuées (pérennité)
- L'état des parements visibles, et des capots de précontrainte
- La mise à jour des cartes d'identité de l'enceinte, et des rapports d'auscultation

PRISE EN COMPTE DES ACCIDENTS GRAVES

Effets généraux consécutifs à une situation d'accident grave

Effets de pression, de température et d'irradiation sur le génie civil et sur les dispositifs d'étanchéité :

- L'enceinte de confinement : sur les matériaux de la paroi (béton, acier), de la peau métallique, peintures
- L'enceinte de confinement en tant que structure,
- Les autres objets de GC concernés par l'AG : le béton en tant que matériau, le puits de cuve et le radier en tant que structures,
- les traversées et leurs dispositifs de fermeture et d'étanchéité (serrage et joints),

Explosion vapeur, explosion hydrogène

Interaction corium-béton sur le radier

PRISE EN COMPTE DES ACCIDENTS GRAVES

Conséquences pour les enceintes du parc EDF

Phénomènes hors dimensionnement : quantification des marges en termes de résistance de l'enceinte. Calculs non linéaires.

A la suite de ces études : décision d'améliorer les dispositifs de fermeture de l'accès des matériels, par augmentation de la capacité de serrage des brides = augmentation de la section et de la nuance d'acier des vis (CP1 et CP2)

Dispositifs de mitigation mis en place dans les bâtiments du réacteur

- recombineurs à hydrogène (limitation du risque de détonation)
- procédure U5 (éventage et filtre à sable)
- sable dans les espaces centraux entre les radiers du Bugey et de Cruas

VIEILLISSEMENT

- Phénomènes de vieillissement du béton : retrait et fluage.
- Evolution de la tension des câbles de précontrainte, du fait de la contraction du béton.
- Le vieillissement des joints accès matériel et sas n'est pas à craindre, car ces joints sont changés régulièrement.

PATHOLOGIES

LES DESORDRES OU PATHOLOGIES CONSTATES SONT LES SUIVANTS

■ Phénomène de gonflement du béton: 2 pathologies

- ❑ Réaction alcali-granat (RAG) ayant pour origine une incompatibilité entre les constituants du ciment (alcalins) et des granulats (silice). Certains sites de Loire
- ❑ Réaction sulfatique interne (RSI), favorisée par une mauvaise maîtrise de la température atteinte lors de la prise du béton. Centrale de Chooz

■ Enceintes 900 MWe. Désordres

- ❑ Peau métallique d'étanchéité
 - Corrosion en partie basse du fût (traité dans les années 1990)
 - Cloquage, vieillissement des peintures >> entretien
- ❑ Paroi en béton précontraint. Cette paroi est soumise aux agents atmosphériques
 - Fissuration des dômes (traitement réalisé)
 - Corrosion de certains aciers, couverte par la maintenance courante

CONCLUSION

Perspective de l'augmentation de la durée de fonctionnement des tranches

- suivi des différents mécanismes de vieillissement au travers des processus de maintenance
- détection des éventuelles pathologies: corrosion des armatures, gonflement du béton
- amélioration des connaissances sur la base, en outre, de programmes de R&D, REX...
- réalisation de contrôles et épreuve enceinte

Merci pour votre attention