

BRANCHE ENERGIES

SERVICE ÉTUDES ET PROJETS
THERMIQUES ET NUCLÉAIRES**EDF**
Electricité
de France

SEPTEN: CIPN 5

CP:

CC: VOIR BORDEREAU DE DIFFUSION

F



N05D0031534 08/07/2005

BORDEREAU DE DIFFUSION

Diffusé le (voir code barres ci-dessus)

Référence du document diffusé : ENGSGC040394-A

Page : 1/1

Titre du document diffusé : Préparation des VD2 des enceintes à double paroi - Analyse du comportement
mécanique de la paroi interne de l'enceinte de confinement

Emetteur : Jean Luc Valfort

Division : GS

Poste : 04.72.82.78.27

Suite à donner : "f" pour action, "o" pour info.

Nombre de copies du bordereau seul

Nombre de documents complets ou partiels

Diffusion Septen	Commentaire			
Direction	Bordereau seul	0	1	
Délégués programmes : M. Labbé	Document complet	1		
Département Sûreté Nucléaire et Environnement (si la note est IPS)	Pages 1 à 4	1		
Divisions	Pages 1 à 4	8		
Chef de projet concerné (M. Perrin)	Document complet	1		
Chef de division émettrice	Document complet	1		
Attachés division (M. Touret)	Document complet	1		
Chef de groupe émetteur	Document complet	1		
Ingénieur rédacteur	Document complet	1		
Pôle Fonds Documentaire (Archivage long si IPS)	Document complet	1		
SEPTEN/DS : M. Courtois	Document complet	1		
Agents GS	Pages 1 à 4	25		
D. Cremeux B Ferracino	Document complet	2		

Diffusion EDF :	Commentaire			
CIPN : MM. Chaloin, Giraud, Pastor, Granger, Delacote	Document complet	5		
CNEN : MM. Gilles, Chen, Barra	Document complet	3		
CEIDRE : M. Olivier	Document complet	1		
R&D : M. Petre Lazar (Renardières), M. Ghavamian (Clamart)	Document complet	2		
R&D : M. Fortier (Chatou, OPP-P18)	Document complet	1		
DTG : Mme Grandjean, M. Badez (Lyon), M. Grimeau (Grenoble)	Document complet	3		
AMT/NO : M. Vermersch	Document complet	1		
UNIFE (Lyon) : M. Cazin	Document complet	1		
DPN-CAPE : M. Coladant	Document complet	1		

Diffusion hors EDF :	Commentaire			

Nombre total de documents (partiels et complets) :

63

Nombre total de copies du bordereau seul :

1

Archivé au FDU : OUI (avec le document diffusé)



Approbateur		
Nom	Date	Visa
Gallitree	7/13/05	

SEPTEN

W 164-01 A



Diffusé le : Voir code barres ci-dessus

Réf. : ENGSGC040394-A

Entité émettrice: **Génie civil, installations, structures**

Rédacteur : **Jean Luc Valfort**

Nbre de pages : 40

Domaine d'application : **P4 – P'4 – N4**

Nbre d'annexes : 0

Titre : **Préparation des VD2 des enceintes à double paroi - Analyse du comportement mécanique de la paroi interne de l'enceinte de confinement**

ENGSGC040394	A	← Référence	E230/006441/EEV2N
		Code Projet →	

Type de document : **Note d'étude**

Mots clés : préparation des VD2, enceinte de confinement à double paroi, comportement mécanique, paroi interne

Résumé : cette note a pour objet d'analyser les dossiers d'études et de calculs existants au sujet du comportement mécanique de la paroi interne des enceintes à double paroi afin d'en tirer des enseignements quant à son influence éventuelle sur les résultats de l'essai d'étanchéité lors de la 2^{ème} visite décennale des tranches.

Rédacteur		Vérificateur		Approbateur			
Nom-Date		Visa		Chef d'entité		Chef de rang supérieur	
Nom-Date		Visa		Nom-Date		Nom-Date	
Jean Luc Valfort 02/02/2005				Etienne Gallitre 4/3/05		Claude Duval 7/7/05	

Evolutions des trois derniers indices

Cocher s'il y a changement de méthodologie
Cocher ici s'il y a évolution des données amont

Indice	Date d'approbation	Motif du changement d'indice	Modifications apportées		

Elaboré sous AQ : OUI	Archivage long : OUI	Archivé au FDU : OUI	Copyright EDF 2004
☐ Confidentiel	L'initiateur établit une liste nominative des destinataires. Chacun d'eux reçoit un exemplaire numéroté et ne peut étendre la diffusion sans l'accord de l'initiateur.		
☐ Dif. Restreinte	L'initiateur établit une liste explicite des destinataires. Le chef de service d'un destinataire peut étendre la diffusion sous sa responsabilité et dans sa Direction (sur la base d'une liste explicite).		
☒ Accès E.D.F	Ne peut être transmis à l'extérieur d'EDF que par un chef de service.		
☐ Accès libre	Document public.		
Inventaire protection	Sous famille : /		

SEPTEN

W 003 F

EDF SEPTEN	Note d'étude ENGSGC040394		Indice A	Page 2/41
Préparation des VD2 des enceintes à double paroi Analyse du comportement mécanique de la paroi interne de l'enceinte de confinement				
FICHE DE GESTION				
Important pour la sûreté (IPS)		OUI ☐	NON ☒	
Document HPIC :		OUI ☐	NON ☒	
Vérification	demandée	OUI ☐	Par EDF ☐	En ligne ☐
Indépendante		NON ☒	Hors EDF ☐	En cours ☐
		En différé ☐	Effectuée ☐	
Responsable vérification (NOM, SERVICE / SOCIÉTÉ) : /				
Prédifusion du présent indice :		OUI ☒	NON ☐	
Après de : voir ci-dessous.				
Existe-t-il un dossier d'étude associé à la note à cet indice ? :		OUI ☒	NON ☐	
Note support à une position technique formalisée du SEPTEN :		OUI ☐	NON ☒	
Contrôle linguistique renforcé :		OUI ☐	NON ☒	
<u>Prédifusion de l'indice A de la note à :</u> SEPTEN MM. Perrin, Courtois CIPN Mme Le Bellégo, M. Granger R&D M. Petre Lazar				

Préparation des VD2 des enceintes à double paroi
Analyse du comportement mécanique de la paroi interne de l'enceinte de confinement

SYNTHÈSE

Cette note traite de la paroi interne des enceintes de confinement à double paroi du parc nucléaire (P4, P'4, N4). Elle est motivée par la préparation des VD2 de ces enceintes [1]. Elle s'insère dans le cadre du projet EV2 et de son lot n° 2 "gestion de la durée de vie" [2][3].

Elle a pour objet d'analyser les études antérieures essentiellement issues du projet EV1 pour mettre en évidence les points qui seraient source éventuelle d'évolution du comportement mécanique avec une influence sur le taux de fuite de l'essai d'étanchéité de la 2^{ème} visite décennale des tranches des paliers P4, P'4, N4.

Ses conclusions doivent permettre d'évaluer la nécessité de réaliser des travaux complémentaires de revêtement pour améliorer l'étanchéité de l'ouvrage¹ avant les VD2², ou de les prévoir en solution de repli en cas de résultat non satisfaisant si l'essai d'étanchéité était réalisé sans travaux préalables.

Cette note ne traite que de l'influence du comportement mécanique de l'ouvrage et de son évolution sous un angle théorique puisqu'elle s'appuie essentiellement sur le dossier d'études et de calculs existants, avec cependant quelques éclairages tirés du retour d'expérience lorsque cela est nécessaire.

Après :

- un rappel du comportement mécanique de l'ouvrage lors des essais d'étanchéité périodique (épreuve) ou en cas d'APRP (modèles aux éléments finis),
- un rappel de la stratégie développée par EDF pour traiter l'évolution du taux de fuite des enceintes à double paroi en VD1, et des marges induites au droit des zones actuellement revêtues,

la note liste les sources potentielles d'évolution ultérieure du taux de fuite à l'échéance des VD2 (voire au delà) et indique pour chacune d'entre elles si cette source constitue ou non un risque. Les facteurs potentiellement influents sont les suivants :

- déformations différées,
- caractéristiques mécaniques (module d'Young en particulier),
- caractéristiques du sol,
- phénomènes d'autocontraintes
- fragilité du béton,
- fatigue liées à la succession des essais d'étanchéité.

¹ Ouvrage : paroi interne de l'enceinte de confinement

² VD2 : deuxième visite décennale

Préparation des VD2 des enceintes à double paroi
Analyse du comportement mécanique de la paroi interne de l'enceinte de confinement

Conclusion

A l'issue de l'analyse, la note met en valeur les zones susceptibles de nécessiter un revêtement complémentaire à poser avant la réalisation de l'essai d'étanchéité de la VD2 :

- en premier lieu, la zone du gousset qui est débitante du point de vue du retour d'expérience, et qui est tendue horizontalement dans toute l'épaisseur de la paroi selon les calculs EV1. Il s'agit selon nous de la zone qui a le potentiel d'évolution future des fuites le plus important,
- en second lieu, la zone de la ceinture torique (et sous ceinture torique), qui est débitante du point de vue du retour d'expérience, mais reste en moyenne en compression selon les calculs EV1 (malgré une traction à l'extrados). Le potentiel d'évolution future des fuites est selon nous plus faible que celui du gousset.

D'une manière générale tout point débitant mesuré en dehors de ces zones et dont le revêtement peut apporter un bénéfice significatif serait à revêtir.

Une analyse technico-économique préalable devra être conduite avant de prendre la décision de revêtir telle ou telle zone afin de bénéficier du ratio fuite masquée / surface revêtue le plus important.

En fonction des résultats de cette analyse technico-économique, il pourra s'avérer plus intéressant selon le retour d'expérience de revêtir le gousset ou la ceinture torique. Cependant le risque potentiel d'évolution nous semble plus élevé dans la zone du gousset, même si dans certains cas la zone de la ceinture torique (et sous ceinture torique) peut apparaître plus débitante que celle du gousset d'après le retour d'expérience.

Il y aurait lieu de compléter et d'enrichir cette analyse par des études relatives à l'examen du dossier de construction des ouvrages (procédures de réalisation sur le chantier, composition des bétons, problèmes rencontrés lors de la construction, ...), et par des études prospectives sur l'impact de l'évolution de certains paramètres (perméabilité, microfissuration diffuse, ...). Ces points ne sont pas abordés dans cette note.

Préparation des VD2 des enceintes à double paroi
Analyse du comportement mécanique de la paroi interne de l'enceinte de confinement**SOMMAIRE**

1. Références.....	7
2. Introduction	8
3. Comportement mécanique de la paroi interne.....	8
3.1 Géométrie des ouvrages.....	8
3.1.1 Fonctionnement mécanique	8
3.1.2 Etudes et calculs réalisés	11
3.2 Comportement mécanique en fonctionnement normal	11
3.3 Comportement mécanique en épreuve	12
3.4 Comportement mécanique en APRP	14
4. Mise en œuvre d'un revêtement d'étanchéité	17
4.1 Stratégie adoptée et choix des zones à revêtir.....	17
4.2 Marges intégrées à la définition des zones à revêtir.....	18
5. Sources potentielles d'évolution ultérieure	21
5.1 Raffinement et réalisme des modèles aux éléments finis	21
5.1.1 Modèle de Coyne et Bellier (projet EV1)	21
5.1.2 Modèle d'EDF et Séchaud et Metz (projet EV2, lot n° 3).....	23
5.1.3 Conclusion.....	24
5.2 Evolution liée aux paramètres influents.....	25
5.2.1 Déformations différées.....	25
5.2.2 Module d'Young du béton.....	25
5.2.3 Caractéristiques du sol	26
5.3 Comportement du béton.....	26
5.3.1 Autocontraintes	26
5.3.2 Fragilité	28
5.3.3 Fatigue liée aux épreuves	30
6. Travaux complémentaires de revêtement	34
6.1 Evolution des zones tendues <u>revêtues</u>	34
6.2 Evolution des zones tendues <u>non revêtues</u>	34
6.3 Emergence de nouvelles zones tendues.....	35
6.4 Evaluation de la nécessité de réaliser des travaux complémentaires.....	35

6.5 Zones complémentaires éventuelles à revêtir avant les VD2.....	40
7. Conclusion	40
8. Suites à donner	41

EDF SEPTEN	Note d'étude ENGSGC040394	Indice A	Page 7/41
Préparation des VD2 des enceintes à double paroi Analyse du comportement mécanique de la paroi interne de l'enceinte de confinement			
1. Références			
[1] LBO – CR – 014 (Sérapis N04A0028611) – EDF-CIPN, Caroline Le Bellégo Compte rendu rapide de réunion – Préparation des VD2 – 1300 – Analyse de risques [2] ENG030002-B (Sérapis N04D0019181) – EDF-SEPTEN Plan de magement du projet "EV2 – Enceintes de confinement" [3] ENG040008-A (Sérapis N04D0015069) – EDF-SEPTEN Planification, ressources, livrables (PRL) du projet "EV2 – Enceintes de confinement" [4] HT-26/00/052/A (Osiris 01A06271) – EDF-R&D Contribution à l'évaluation de l'influence de la durée cumulée des paliers à la pression de dimensionnement sur la résistance mécanique et l'étanchéité de la paroi interne des enceintes de confinement, synthèse des données bibliographiques sur le fluage en traction et le couplage fluage - fissuration dans les structures en béton [5] HT-26/00/038/A (Osiris 01A02765) – EDF-R&D (note à l'état prédiffusé) Contribution à l'évaluation de l'incidence potentielle du cyclage des épreuves à la pression de dimensionnement sur la résistance mécanique et l'étanchéité de la paroi interne des enceintes de confinement, synthèse des données bibliographiques sur les effets des cyclages et la fatigue dans les structures en béton [6] E-N-ES-GC/01-00272 (Osiris 01D04481) – EDF-SEPTEN Enceinte à double paroi, risque d'éclatement du parement intrados de la paroi interne en cas d'APRP [7] E-N-ES-GC/01-00273 (Osiris 01D04480) – EDF-SEPTEN Enceintes de confinement à double paroi, marges de mise en oeuvre du revêtement lors de la VD3 [8] Rapport DES n° 458 (Osiris 01A20193) – IPSN Comportement des enceintes de confinement des réacteurs à eau sous pression de 1300 et 1450 MWe [9] ENESGC021051 (Sérapis N02D0011436) – EDF-SEPTEN Réponse à la DGSNR, fiche de synthèse, demande D009, lettre DGSNR/SD2/N° 359/2002 du 15.05.2002 (Osiris 02A09071) [10] ENGSDS030103-A (Sérapis N04D0014932) – EDF-SEPTEN Modélisation réaliste d'une enceinte REP 1300 MWe pour l'évaluation des zones à revêtir [11] 2000-02-0004 indice A (Osiris 01A00285) – LCPC Flamanville EDF/SEPTEN, étude du comportement de la paroi interne de l'enceinte de Flamanville (tranches 1 et 2), rapport de synthèse [12] E-N-ES-GC/01-00375-A (Osiris 01D08196) – EDF-SEPTEN EV1, lot n° 8, Civaux 1, réflexions sur les causes de l'augmentation du taux de fuite global de la paroi interne de l'enceinte de confinement entre l'épreuve préopérationnelle et l'épreuve VCI [13] E-N-S-GC/00-00722-A (Osiris 00D09152) – EDF-SEPTEN Projet EV1 – Lot 3 – Détermination de l'étendue des zones en traction – Etude de sensibilité du modèle aux paramètres prépondérants [14] ENGSDS030104-A (Sérapis N04D0024414) – EDF-SEPTEN Méthode fiabiliste de prévision des déformations différées des enceintes : faisabilité de mise en œuvre industrielle [15] ENGSDS040249-A (Sérapis N04D0021935) – EDF-SEPTEN Application de la méthode fiabiliste à la prévision des déformations différées des paliers CP0 et CPY			

EDF SEPTEN	Note d'étude ENGSGC040394	Indice A	Page 8/41
---------------	-------------------------------------	--------------------	--------------

Préparation des VD2 des enceintes à double paroi
Analyse du comportement mécanique de la paroi interne de l'enceinte de confinement

[16] ENGSDS030282 (Sérapis N03D0012512) – EDF-SEPTEN

Réponse à la DGSNR, fiche de synthèse – Réponse à la demande D010 du courrier DGSNR/SD2/N° 359/2002 du 15.05.2002 (Osiris 02A09071) – Transmise à DPN par courrier ENGSDS030287 (Sérapis N03D0012510)

2. Introduction

Cette note traite de la paroi interne des enceintes de confinement à double paroi du parc nucléaire (P4, P'4, N4). Elle est motivée par la préparation des VD2 de ces enceintes [1]. Elle s'insère dans le cadre du projet EV2 et de son lot n° 2 "gestion de la durée de vie" [2][3].

Elle a pour objet d'analyser les études antérieures essentiellement issues du projet EV1 pour mettre en évidence les points qui seraient source éventuelle d'évolution du comportement mécanique avec une influence sur le taux de fuite de l'essai d'étanchéité de la 2^{ème} visite décennale des tranches des paliers P4, P'4, N4.

Ses conclusions doivent permettre d'évaluer la nécessité de réaliser des travaux complémentaires de revêtement pour améliorer l'étanchéité de l'ouvrage³ avant les VD2⁴, ou de les prévoir en solution de repli en cas de résultat non satisfaisant si l'essai d'étanchéité était réalisé sans travaux préalables.

Cette note ne traite que de l'influence du comportement mécanique de l'ouvrage et de son évolution sous un angle théorique puisqu'elle s'appuie essentiellement sur le dossier d'études et de calculs existants, avec cependant quelques éclairages tirés du retour d'expérience lorsque cela est nécessaire.

Elle ne traite pas, en particulier, de l'influence des conditions de mise en œuvre ou de la composition et de la perméabilité des bétons couplées à un éventuel endommagement diffus qui doivent être abordées dans un autre cadre et qui peuvent elles aussi être source d'évolutions potentielles du taux de fuite.

3. Comportement mécanique de la paroi interne

3.1 Géométrie des ouvrages

3.1.1 Fonctionnement mécanique

La géométrie de l'ouvrage est relativement simple puisqu'il s'agit de l'assemblage de 3 parties principales :

- un cylindre (fût),
- un fond plat (radier),
- et une coupole hémisphérique (dôme).

Leur nécessaire assemblage pour assurer un monolithisme et une étanchéité à la structure induit des changements de raideur et des ruptures géométriques entraînant l'apparition de variations des champs de contrainte suffisamment importantes pour qu'apparaissent des zones où la contrainte est inférieure à 1.00 MPa de compression en épreuve (valeur spécifiée par le RCC-G en zone courante), voire passe en traction dans certains cas.

³ Ouvrage : paroi interne de l'enceinte de confinement

⁴ VD2 : deuxième visite décennale

Préparation des VD2 des enceintes à double paroi
Analyse du comportement mécanique de la paroi interne de l'enceinte de confinement

Il faut ajouter à ce phénomène, le fait que la structure participe au fonctionnement de l'installation. Pour cela, il a été nécessaire de créer un ensemble de traversées de dimensions très diverses allant de la dizaine de centimètres à plusieurs mètres. Ces traversées viennent elles aussi perturber le champ de contrainte. C'est le cas en particulier de celles qui ont un diamètre supérieur à l'épaisseur de l'ouvrage (sas d'accès pour le personnel, tampon de l'accès matériel).

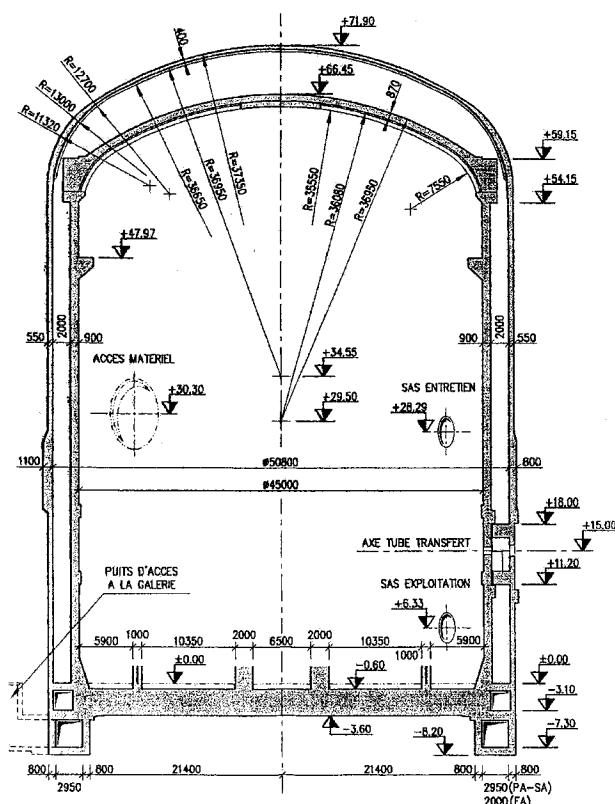
De cet ensemble résulte un ouvrage comportant des zones courantes où le critère de 1.00 MPa de compression est respecté en épreuve, et des zones où ce critère n'est pas respecté du fait de leur singularité.

Deux cas se présentent alors :

- soit l'étendue de ces zones ainsi que l'intensité des contraintes évoluent de manière sensible dans le temps du fait de phénomènes liés au comportement du béton et des câbles de précontrainte en particulier,
- soit elles restent relativement stables et présentent peu d'évolution liée au temps.

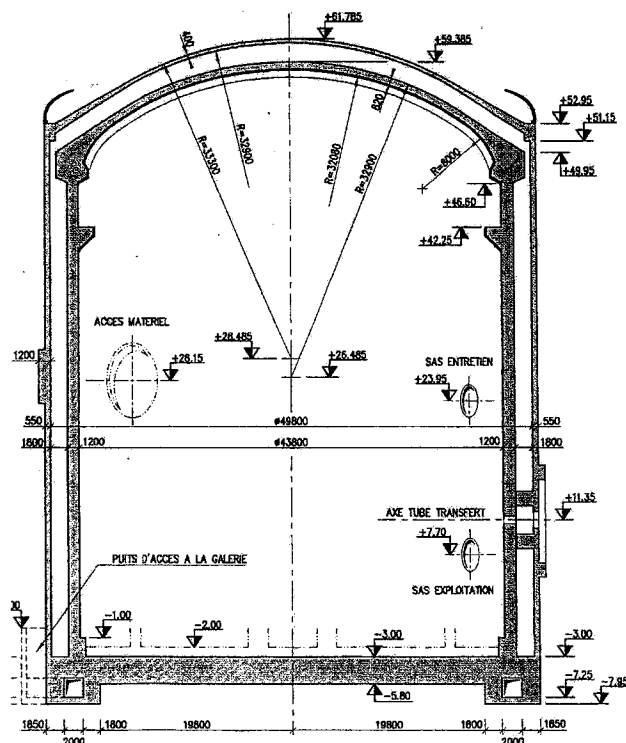
Nous verrons plus loin qu'une partie de la stratégie de revêtement d'EDF est basée sur cette observation, en particulier pour les zones soumises à de la traction.

Enfin, le parc nucléaire est constitué de différents paliers qui possèdent chacun des particularités qui impliquent que les zones où le critère de 1.00 MPa n'est pas respecté en épreuve varient suivant la conception du palier (présence d'un plancher à +6.600 sur N4, épaisseur de la paroi réduite sur P4).

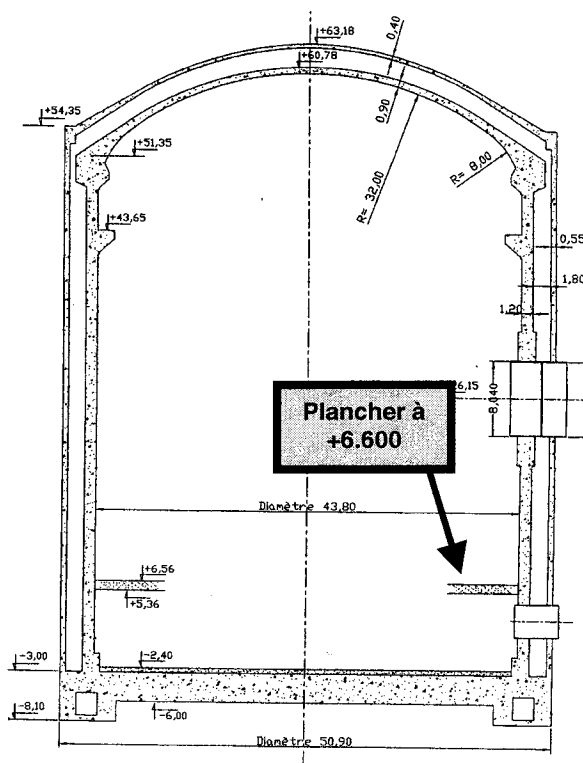


Palier P4 - Coupe schématique verticale du bâtiment du réacteur (valable tous sites sauf galerie)

Préparation des VD2 des enceintes à double paroi
Analyse du comportement mécanique de la paroi interne de l'enceinte de confinement



Palier P'4 - Coupe schématique verticale du bâtiment du réacteur (valable tous sites sauf galerie)



Palier N4 - Coupe schématique verticale du bâtiment du réacteur (valable tous sites sauf galerie)

EDF SEPTEN	Note d'étude ENGSGC040394	Indice A	Page 11/41
Préparation des VD2 des enceintes à double paroi Analyse du comportement mécanique de la paroi interne de l'enceinte de confinement			
3.1.2 Etudes et calculs réalisés A ce jour, EDF a conduit avec l'aide de bureaux d'études (Coyne et Bellier, Séchaud et Metz) ou par ses propres moyens (Code_Aster) une série de calculs et de modélisations aux éléments finis couvrant l'ensemble du parc des enceintes de confinement à double paroi [13]. Ces études ont été menées dans le cadre des projets EV1 (définition des zones à revêtir pour améliorer l'étanchéité) et EV2 (études prospectives du comportement des enceintes de confinement, gestion de la durée de vie). Elles seront abordées dans un prochain paragraphe pour mettre en évidence le réalisme des calculs conduits, et les conséquences que pourrait avoir un raffinement de la modélisation sur l'émergence de nouvelles zones soumises à de la traction, ou l'extension de zones déjà identifiées. Ces études se concluent en général par une cartographie des contraintes de l'ouvrage permettant de connaître son état mécanique (en fonctionnement normal, épreuve, et APRP) et de prendre la décision de revêtir telle ou telle zone pour améliorer l'étanchéité selon une stratégie de choix élaborée par EDF et présentée à l'Autorité de Sûreté Nucléaire qui l'a favorablement accueillie (Groupe Permanent des Experts de novembre 2001). 3.2 Comportement mécanique en fonctionnement normal Le fonctionnement normal qui constitue le cas de charge le moins pénalisant pour la structure n'est pas exempt cependant de zones d'ouvrage où apparaît de la traction. D'après les calculs conduits pour 40 ans de fonctionnement, nous constatons le comportement suivant : - au droit du gousset, la contrainte horizontale moyenne est une traction. Suivant les sites, les contraintes horizontales de traction se répartissent sur l'ensemble de l'épaisseur de la paroi dans le cas de Civaux 1 (N4, quelques MPa), ou préférentiellement sur l'extrados sur Belleville (P'4, de l'ordre du MPa). Dans le sens vertical, la contrainte moyenne est une compression, l'intrados étant systématiquement comprimé et l'extrados tendu sur une faible hauteur avec des contraintes de traction de valeurs faibles, - au droit du tampon de l'accès matériel quel que soit le site, la zone périphérique reste comprimée sur toute l'épaisseur de l'ouvrage, dans certains cas de la traction peut être détectée, elle reste cependant relativement faible et limitée, - au droit de la ceinture torique (et sous ceinture torique) et de la console du pont polaire, la contrainte moyenne (verticale et horizontale) reste une compression avec cependant de la traction en extrados dans le sens vertical (de l'ordre du MPa), et quelques zones très limitées tant en valeur qu'en étendue en extrados dans le sens horizontal, - au droit du dôme, la compression moyenne reste une compression, quelques zones périphériques très limitées tant en valeur qu'en étendue sont soumises à de la traction. Nous relevons le cas relativement singulier de Civaux 1 (N4) au niveau du gousset qui présente une traction assez importante sur plusieurs mètres de hauteur. Ceci peut s'expliquer par ses déformations différées les plus importantes du parc nucléaire et par la conception du palier N4 (plancher à +6.600) qui bride plus que sur les autres paliers la partie basse de l'ouvrage amplifiant ainsi des contraintes qui existent aussi sur ceux-ci.			

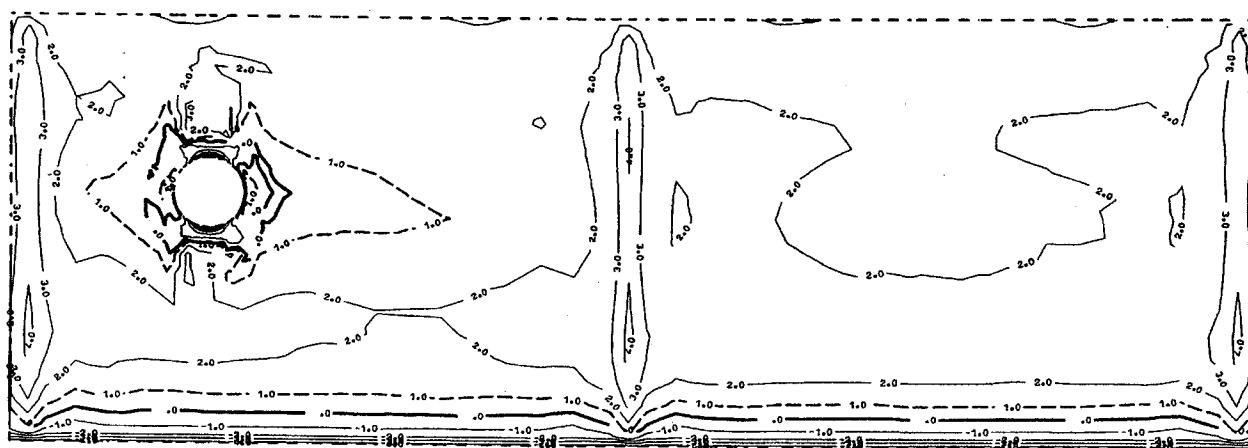
Préparation des VD2 des enceintes à double paroi
Analyse du comportement mécanique de la paroi interne de l'enceinte de confinement

3.3 Comportement mécanique en épreuve

L'épreuve est le cas de chargement le plus pénalisant pour l'ouvrage comme nous l'avons déjà évoqué dans un courrier précédent [7]. C'est lui qui sert de base à la définition des zones à revêtir pour améliorer l'étanchéité de l'ouvrage.

Au bout de 40 ans de fonctionnement, les zones affectées par la traction sont les suivantes :

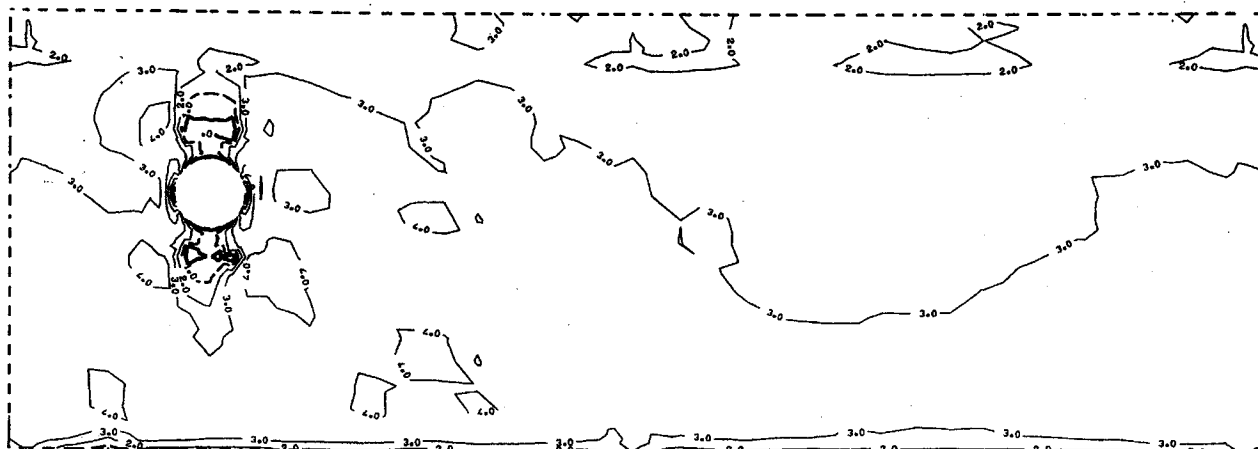
- au niveau du gousset, la contrainte moyenne horizontale est une traction allant de l'ordre du MPa (P'4, P4) à plusieurs MPa (N4), l'intrados et l'extrados sont tendus, la zone concernée est nettement plus étendue par rapport à celle du fonctionnement normal. Ceci est très marqué sur les sites où la partie basse est bridée, la hauteur peut atteindre la dizaine de mètres (sites sur sol dur comme Flamanville, ou le palier N4 avec le bridage induit par le plancher à +6.600). La contrainte moyenne verticale est une compression (intrados comprimé, extrados légèrement tendu sur une faible hauteur de l'ordre du mètre),
- au niveau du tampon de l'accès matériel, la contrainte moyenne en périphérie est une traction plus ou moins marquée tant en valeur qu'en étendue suivant les sites, elle peut atteindre plusieurs MPa, sur des surfaces de l'ordre de plusieurs centaines de m²,
- au niveau de la ceinture torique (et sous ceinture torique) et de la console du pont polaire, les contraintes moyennes horizontale et verticale sont une compression. En extrados horizontal et vertical, il existe de la traction de valeur faible (de l'ordre du MPa) mais qui peut cependant être relativement étendue comme dans le cas de Civaux 1 dans le sens horizontal (plusieurs centaines de m²). En intrados, il apparaît dans certains cas une faible traction dans le sens horizontal de manière relativement limitée (quelques dizaines de m²),
- au niveau du dôme, les contraintes moyennes sont de la compression. Quelques zones de traction de faibles valeur et étendue peuvent apparaître en extrados.



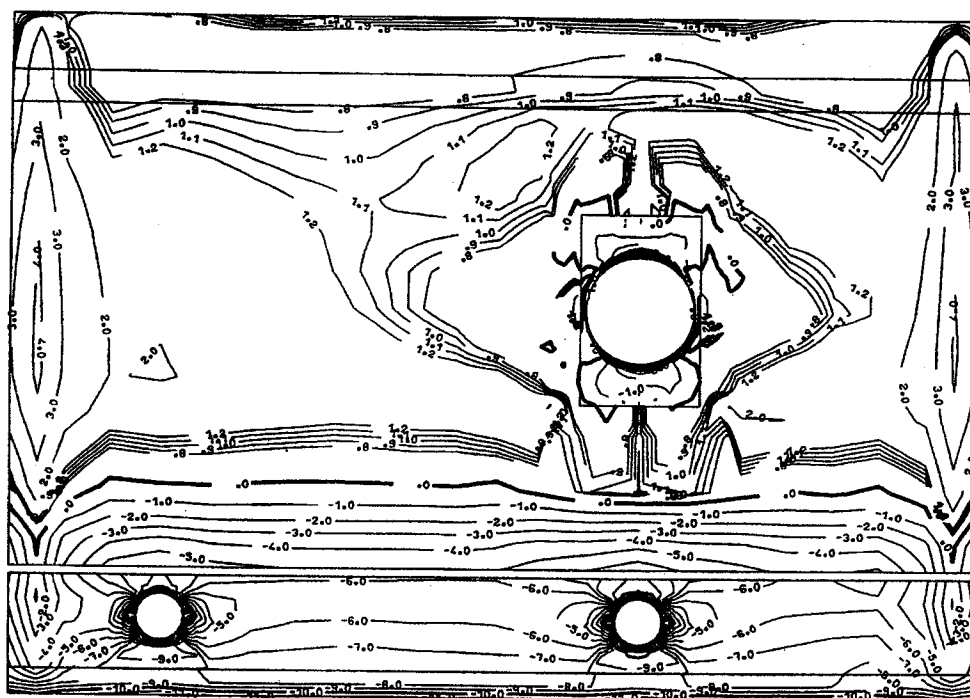
Cattenom – Carte d'isovaleurs de contrainte moyenne horizontale – Epreuve à 40 ans *

* Les zones délimitées par un trait gras sont tendues

Préparation des VD2 des enceintes à double paroi
Analyse du comportement mécanique de la paroi interne de l'enceinte de confinement



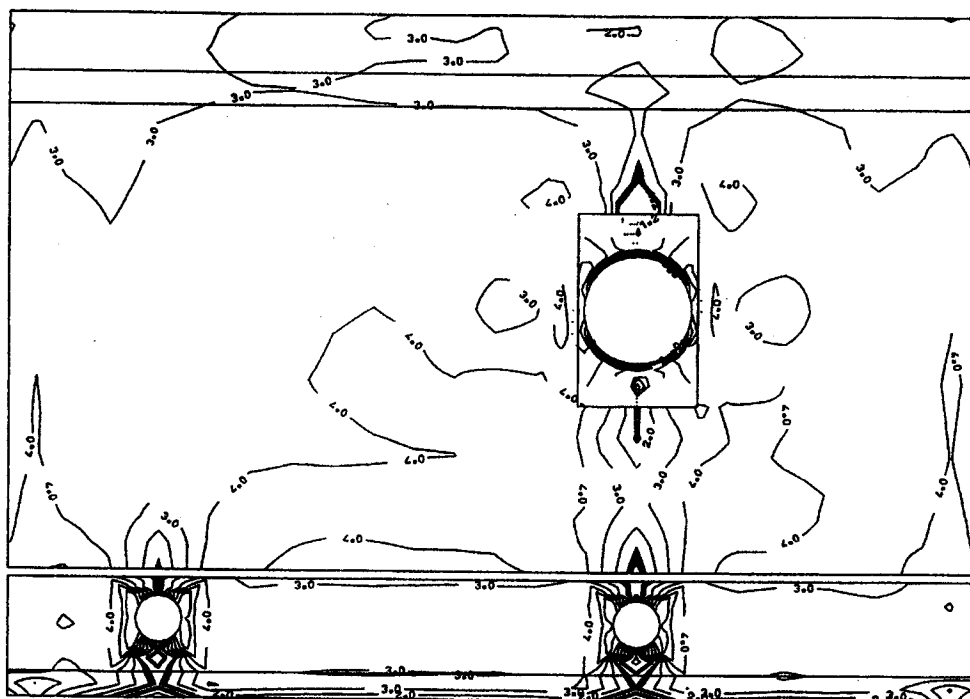
Cattenom – Carte d'isovaleurs de contrainte moyenne verticale – Epreuve à 40 ans *



Civaux 1 - 1/2 développé de la jupe – Carte d'isovaleurs de contrainte moyenne horizontale – Epreuve à 40 ans *

* Les zones délimitées par un trait gras sont tendues

Préparation des VD2 des enceintes à double paroi
Analyse du comportement mécanique de la paroi interne de l'enceinte de confinement



Civaux 1 - 1/2 développé de la jupe – Carte d'isovaleurs de contrainte moyenne verticale – Epreuve à 40 ans *

3.4 Comportement mécanique en APRP

L'APRP est paradoxalement un cas moins pénalisant que l'épreuve pour l'ouvrage sur le plan de son comportement mécanique. Ceci est dû au fait qu'à la mise en pression pendant l'accident vient se superposer un effet thermique qui induit une compression généralisée de l'intrados venant contrer la décompression (voire la mise en traction) provoquée par la pression interne de l'ouvrage.

Cette mise en compression généralisée à l'intrados est induite par le fait que la face interne de l'ouvrage est chauffée et a donc tendance à s'allonger par rapport à la face externe restant à température quasi ambiante. Cependant cette tendance à l'allongement est contrariée par l'hyperstaticité de l'ouvrage qui le bride, entraînant ainsi une mise en compression de la face interne.

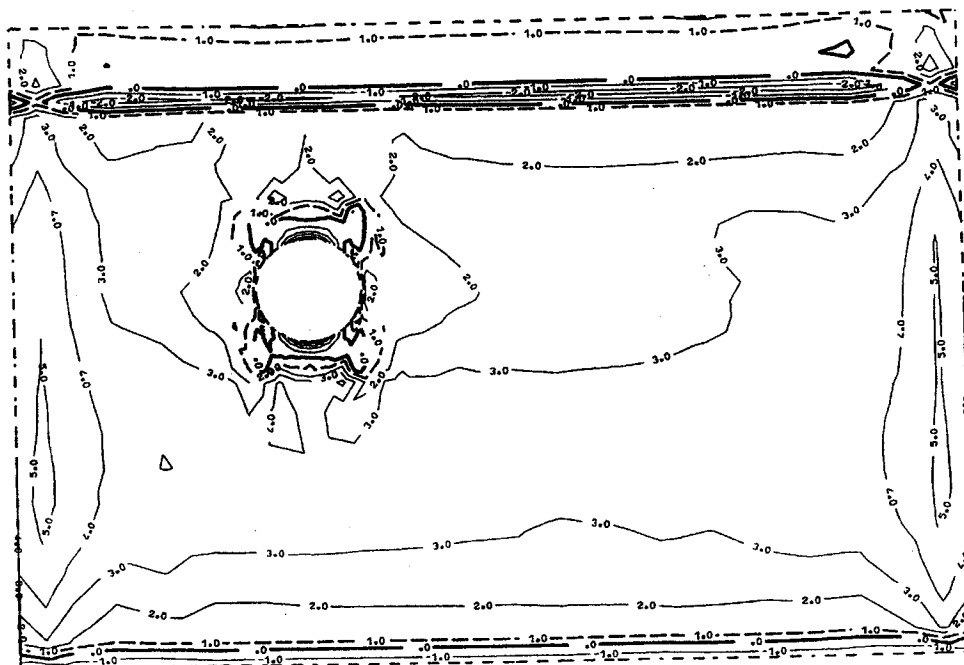
Pour assurer l'équilibre de la section de béton, la face extrados est majoritairement exposée à de la traction en particulier dans la direction horizontale, la direction verticale étant moins concernée.

Globalement, la contrainte moyenne reste majoritairement sur l'ensemble de l'ouvrage une compression. Lorsqu'elle passe localement en traction, son étendue est couverte par celle résultant de l'épreuve, en particulier dans la zone la plus sensible de l'ouvrage : le tampon de l'accès matériel. Nous verrons plus loin la marge existant entre l'épreuve et l'APRP.

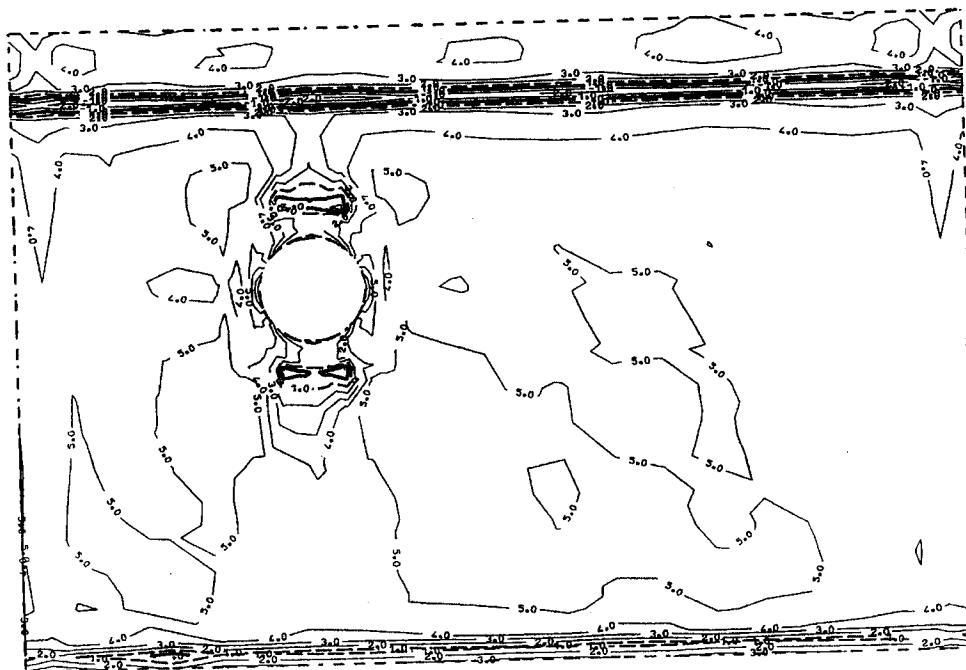
Cependant, il existe une zone non couverte par l'épreuve : la zone de la console du pont polaire est tendue en moyenne (horizontalement et verticalement), la contrainte est de l'ordre de la résistance à la traction du béton. Cette zone est limitée à la zone de la console elle-même sur 2 à 3 mètres de haut.

Préparation des VD2 des enceintes à double paroi
Analyse du comportement mécanique de la paroi interne de l'enceinte de confinement

Le niveau de la compression en intrados est relativement élevé dans la mesure où celle-ci peut avoisiner la valeur de la limite en compression du béton [6]. Quant à la traction en extrados, elle est de l'ordre de grandeur de la résistance à la traction du béton.



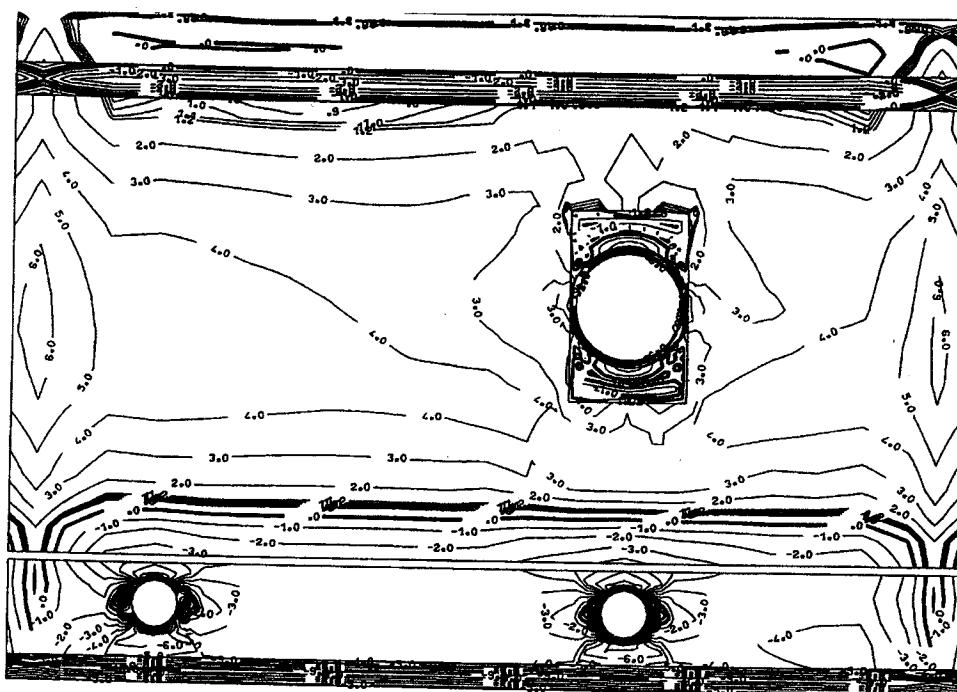
Belleville – ½ développé de la jupe – Carte d'isovaleurs de contrainte moyenne horizontale – APRP à 40 ans *



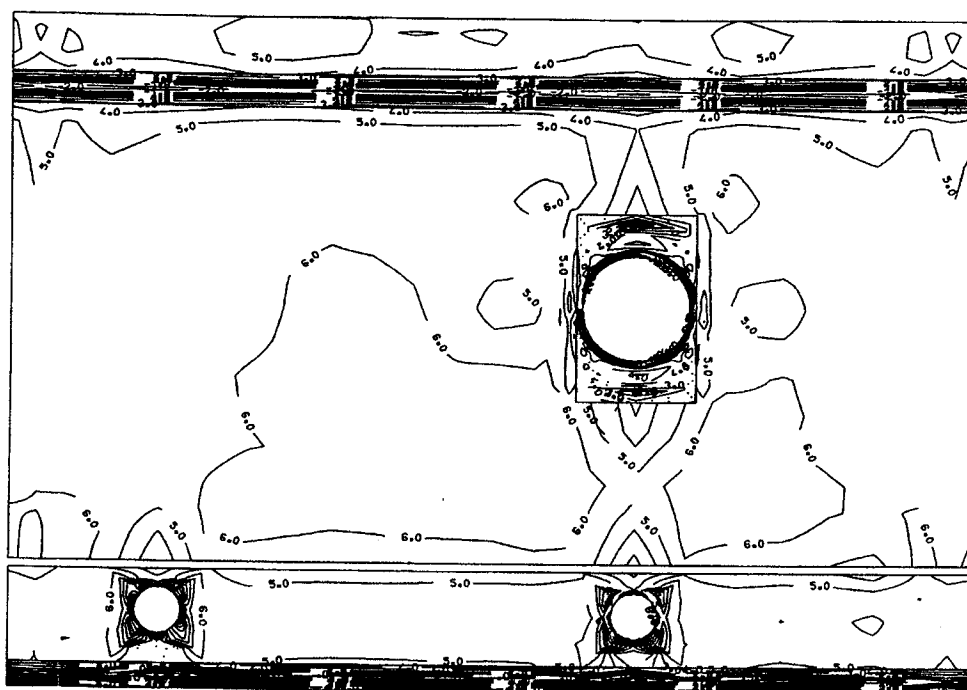
Belleville – ½ développé de la jupe – Carte d'isovaleurs de contrainte moyenne verticale – APRP à 40 ans *

* Les zones délimitées par un trait gras sont tendues

Préparation des VD2 des enceintes à double paroi
Analyse du comportement mécanique de la paroi interne de l'enceinte de confinement



Civaux 1 - ½ développé de la jupe – Carte d'isovaleurs de contrainte moyenne horizontale – APRP 6mn à 40 ans *



Civaux 1 - ½ développé de la jupe – Carte d'isovaleurs de contrainte moyenne verticale – APRP 6mn à 40 ans *

* Les zones délimitées par un trait gras sont tendues

Préparation des VD2 des enceintes à double paroi
Analyse du comportement mécanique de la paroi interne de l'enceinte de confinement

4. Mise en œuvre d'un revêtement d'étanchéité

4.1 Stratégie adoptée et choix des zones à revêtir

La stratégie adoptée par EDF pour choisir les zones à revêtir pour améliorer l'étanchéité de l'ouvrage a été présentée à l'Autorité de Sûreté Nucléaire lors du Groupe Permanent des Experts du 29 novembre 2001 qui n'a pas émis de remarques la mettant en cause.

Elle s'articule autour de 3 axes :

- le retour d'expérience des épreuves antérieures et des fuites qui ont pu être relevées pendant leur déroulement,
- la mise en évidence par une modélisation aux éléments finis de zones tendues potentiellement sources de fuite en épreuve ou en APRP,
- enfin, le caractère éventuellement évolutif de ces zones identifiées par le R.EX. ou les calculs.

Les points précédents sont classés par ordre d'importance décroissant en fonction de leur prépondérance dans le choix des zones à revêtir. Le R.EX. intervient donc dans ce choix en premier lieu, puis les résultats de calculs et enfin le caractère évolutif.

Cette stratégie a permis d'optimiser les travaux à réaliser et de ne pas revêtir systématiquement toutes les zones tendues selon les calculs (voire celles présentant une contrainte de compression inférieure à 1.00 MPa) tout en préservant la sûreté de l'ouvrage.

Son application a conduit à revêtir sur le parc :

- toutes les zones périphériques du tampon de l'accès matériel des tranches P4, P'4 et N4 sans exception, car elles présentent en général des fuites, elles sont tendues selon les calculs et évolutives dans le temps,
- au cas par cas la zone du gousset, en fonction du R.EX. des fuites relevées et de la présence éventuelle de produits de colmatage inadaptés mis en œuvre lors de la construction, et enfin des calculs qui montrent que cette zone est d'autant plus tendue que l'ouvrage est posé sur un sol dur (goussets revêtus sur Flamanville 1 et 2, Paluel 1 et 4, Belleville 1 et 2, Cattenom 1, Golfech 2, Penly 2, et Civaux 1),
- ponctuellement, la partie haute du fût au droit de la console du pont polaire de Belleville 1 et 2 (au dessus et au dessous de la console).

Les autres zones de l'ouvrage n'ont pas été revêtues car EDF a estimé qu'elles ne contribuent pas ou peu au débit de fuite global lors de l'épreuve et qu'elles sont a priori peu évolutives. Il s'agit essentiellement du dôme, de la ceinture torique (et sous ceinture torique) et de la console du pont polaire (sauf à Belleville).

Les zones d'ouvrage sont classées en 2 catégories. Celles de nature évolutive sont dites "zones de type 1", elles bénéficient de la pose d'un revêtement composite. Par opposition les zones non évolutives d'épreuve en épreuve sont appelées "zones de type 2", celles-ci ne bénéficient à ce jour d'aucun revêtement.

Une seule zone de type 1 a été identifiée par EDF. Il s'agit du tampon de l'accès matériel comme le souligne l'IRSN dans son rapport [9], page 91. Cette zone fait l'objet d'un revêtement systématique sur l'ensemble des tranches.

Préparation des VD2 des enceintes à double paroi
Analyse du comportement mécanique de la paroi interne de l'enceinte de confinement

4.2 Marges intégrées à la définition des zones à revêtir

La définition des zones à revêtir bénéficie de marges générées par le choix des hypothèses de calculs, la mise en œuvre, le comportement de l'ouvrage en épreuve et en APRP [7].

Marge liée au comportement de l'ouvrage en APRP

Comme nous l'avons rappelé précédemment, l'APRP est enveloppé par l'épreuve du point de vue du comportement mécanique de l'ouvrage, ceci étant lié essentiellement à la présence de l'effet thermique comprimant l'intrados.

Ce comportement particulier en APRP permet de dégager une marge entre l'épreuve qui sert de référence à la définition des zones à revêtir et l'APRP.

Marge liée aux hypothèses de calcul

La réalisation des calculs selon la méthode des éléments finis a nécessité la prise en compte d'hypothèses relatives à l'évolution des déformations différées. Les calculs réalisés par le bureau d'études Coyne et Bellier s'appuient sur les valeurs de déformations différées estimées après 40 ans de fonctionnement, en extrapolant statistiquement les valeurs mesurées par EDF-DTG.

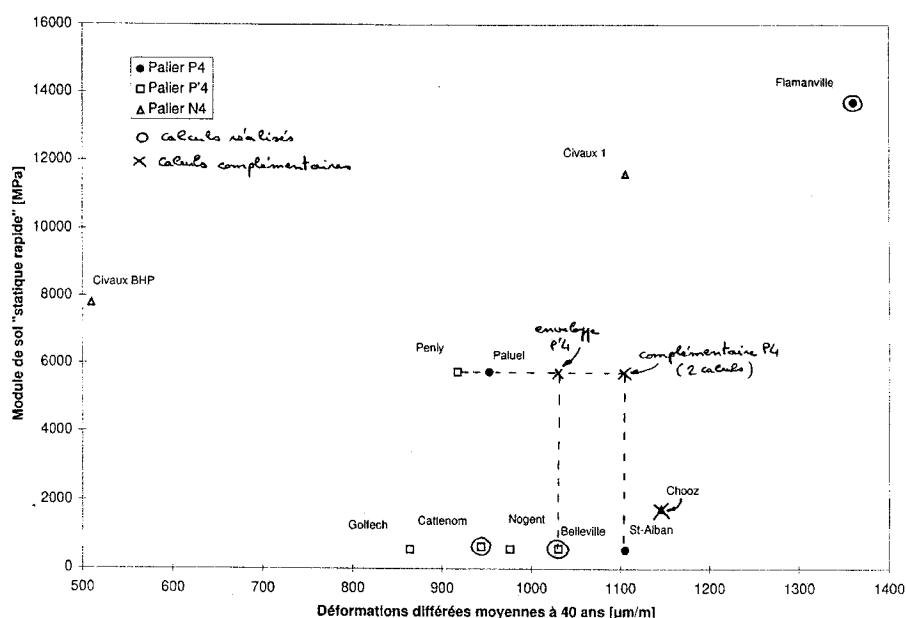
Ainsi, il existe une marge entre les déformations différées qui seront effectivement mesurées au moment de la VD2 et l'instant choisi pour réaliser les calculs, c'est à dire 20 ans plus tard.

De plus, EDF met en place une surveillance périodique pour vérifier que ces hypothèses ne sont pas remises en cause par les mesures acquises progressivement tout au long de la vie de l'ouvrage [9].

Marge liée au regroupement des calculs par paliers

Afin de limiter le nombre de calculs à réaliser pour définir les zones à revêtir, EDF a décidé de regrouper par palier certaines tranches en retenant comme hypothèses de béton et de sol celles de la tranche la plus pénalisante (sites fictifs enveloppes).

Les tranches qui sont dans ce cas présentent ainsi une marge.



Choix des sites fictifs par palier en fonction des déformations différées moyennes du béton et du module du sol

Préparation des VD2 des enceintes à double paroi
Analyse du comportement mécanique de la paroi interne de l'enceinte de confinement

Marge liée au critère de revêtement autour du T.A.M.

Le rapport IPSN [9] rappelle le critère retenu par EDF pour définir la localisation et l'étendue des zones de type 1 à revêtir pour améliorer l'étanchéité de l'ouvrage.

Selon EDF, la surface à revêtir est limitée par l'isovaleur de contrainte moyenne à 0.00 MPa, calculée en épreuve après 40 ans de fonctionnement. Elle marque la frontière entre les zones d'ouvrages restant comprimées et celles subissant une traction.

Il existe une marge liée à la définition du critère dans la mesure où la résistance à la traction du béton est négligée (un béton tendu ne présente pas forcément de fuite). Les contraintes de traction calculées sont inférieures à cette résistance sur une part relativement importante de la zone définie par le critère précédent.

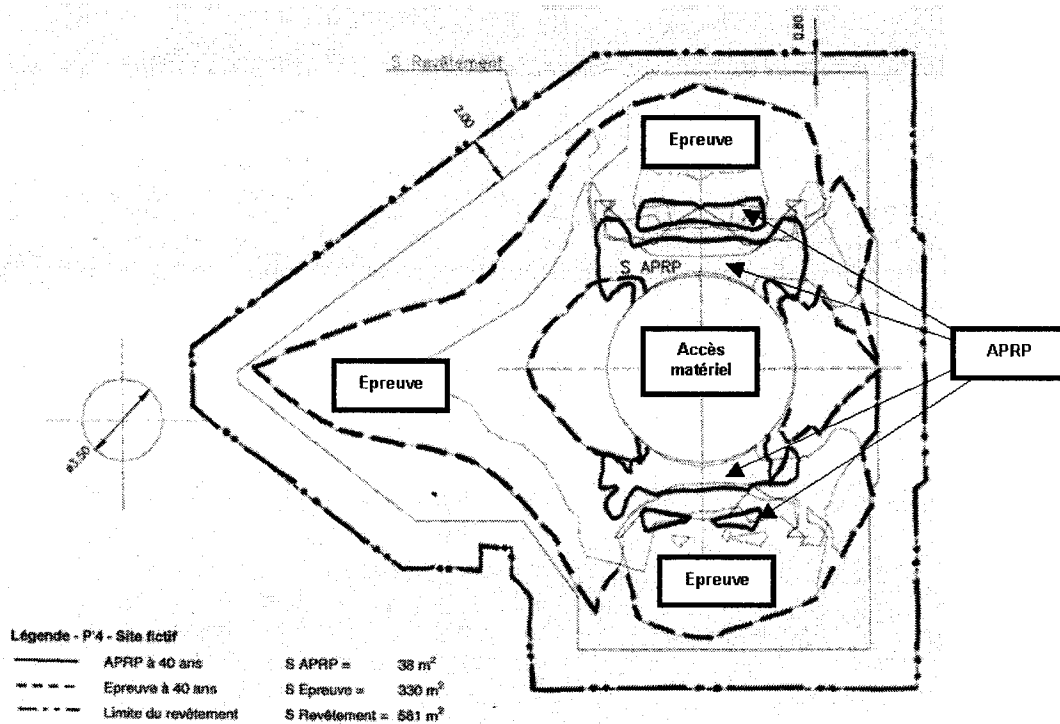
Marge liée à la mise en œuvre du revêtement

L'application du critère de définition de la zone à revêtir reste relativement théorique. Du point de vue de la réalisation du revêtement sur le site, il est exclu de revêtir strictement la zone ainsi définie dont le contour est irrégulier.

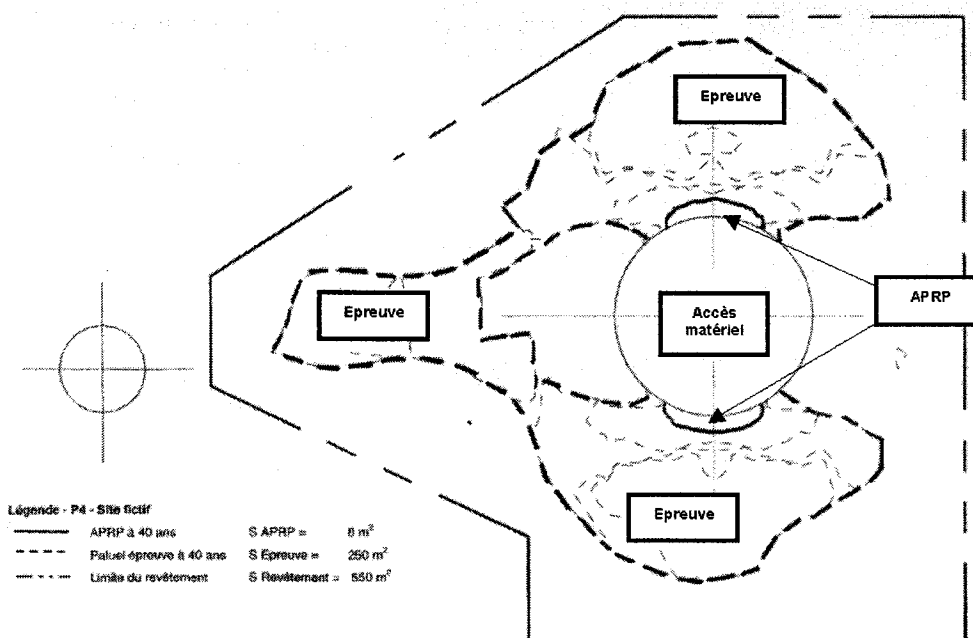
Il s'avère en effet plus efficace pour la mise en œuvre de définir une zone dont la surface enveloppe celle imposée par le critère et dont la forme géométrique est plus simple et plus régulière.

Le revêtement est ainsi étendu au delà de la zone strictement définie par le critère de revêtement, ce qui dégage une marge. Par ailleurs, une bande de revêtement périphérique supplémentaire de largeur variable suivant les tranches (jusqu'à 2 mètres) a été posée par rapport à la limite du critère afin de pallier en particulier les imprécisions du calcul (finesse du maillage).

Préparation des VD2 des enceintes à double paroi
Analyse du comportement mécanique de la paroi interne de l'enceinte de confinement



Site fictif P'4 (déformations différées de Belleville, module de sol de Penly) - Enveloppe des contraintes de traction en intrados et en moyenne à 40 ans (épreuve et APRP) et surface à revêtir sur le site (les encadrés indiquent la position des zones tendues)



Site fictif P4 (déformations différées de Saint Alban, module de sol de Paluel) - Enveloppe des contraintes de traction en intrados et en moyenne à 40 ans (épreuve et APRP) et surface à revêtir sur le site (les encadrés indiquent la position des zones tendues)

Préparation des VD2 des enceintes à double paroi
Analyse du comportement mécanique de la paroi interne de l'enceinte de confinement

5. Sources potentielles d'évolution ultérieure

5.1 Raffinement et réalisme des modèles aux éléments finis

Il existe 2 lots d'études relatives au comportement mécanique de l'ouvrage.

L'un a été réalisé dans le cadre du projet EV1. Il avait pour objet de déterminer les zones de l'ouvrage qui étaient tendues en épreuve et en APRP, afin de définir ultérieurement les surfaces à revêtir.

L'autre s'est déroulé dans le cadre du projet EV2. Son objectif est d'identifier les sources d'amélioration de la modélisation initiale (projet EV1) et d'estimer leur impact sur la localisation et l'étendue des zones tendues.

5.1.1 Modèle de Coyne et Bellier (projet EV1)

Le modèle aux éléments finis du bureau d'études Coyne et Bellier sert de base au dossier de mise en œuvre du revêtement composite sur le parc des enceintes à double paroi. Cependant, il pourrait être amélioré sur certains points [10].

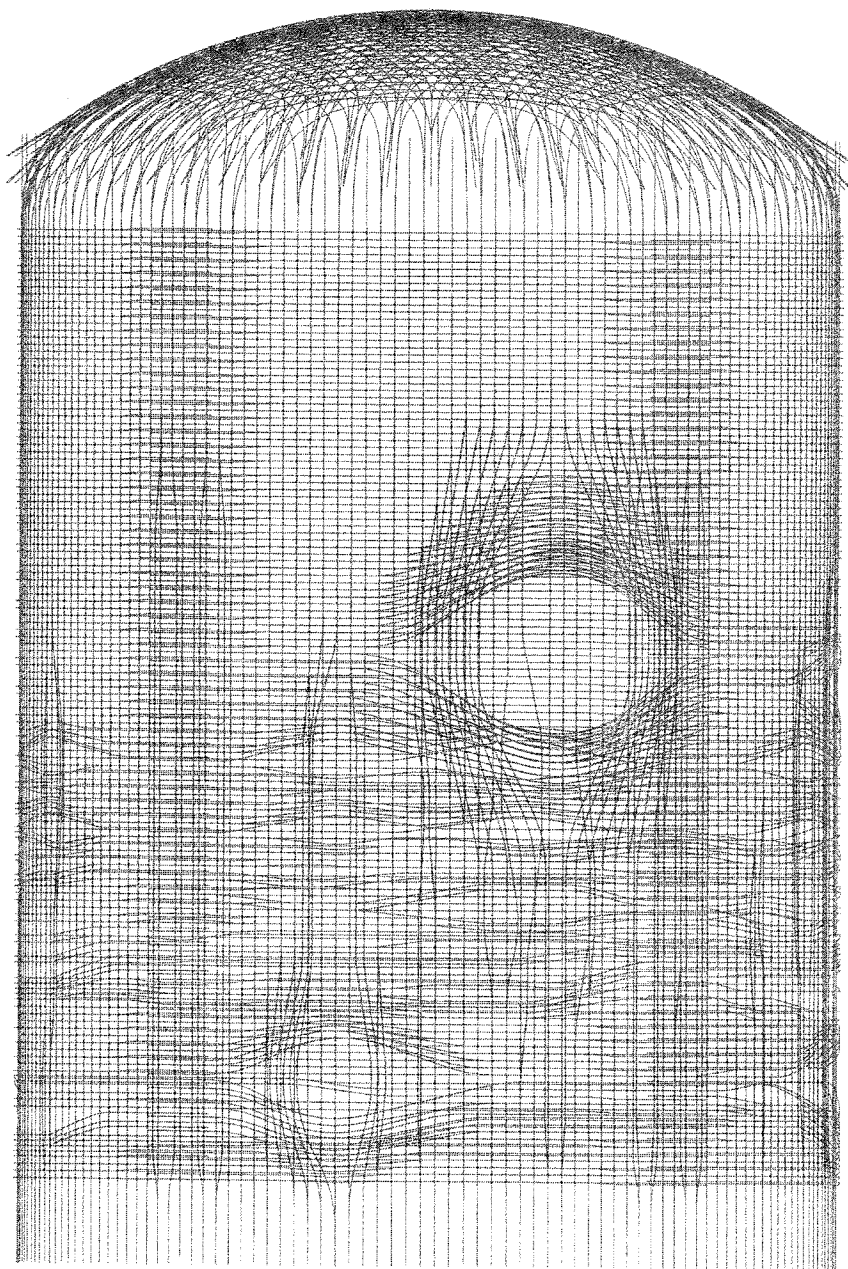
Nous pouvons en identifier 3 principaux :

- la finesse du maillage. Elle n'est pas tout à fait appropriée dans certaines zones d'ouvrage, en particulier au niveau de la jonction du radier avec le gousset. Malgré des capacités de calculs importantes, Coyne et Bellier a néanmoins été obligé de tenir compte de leur limite en réalisant un maillage plus grossier qu'il ne devrait l'être dans cette zone,
- les déformations différées. Elles sont introduites dans la modélisation sous la forme d'un module d'Young réduit pour les actions de longue durée induisant du fluage (poids propre, précontrainte), et par une déformation de retrait isotrope constante pour toute la structure (sauf au niveau du radier). Il n'y a pas d'interaction directe entre la précontrainte et l'évolution des déformations différées,
- la modélisation des câbles. Les câbles de précontraintes, ainsi que les pertes induites, sont modélisés à part, puis le champ de force induit sur la structure est introduit dans le modèle aux éléments finis.

Ces points ne remettent pas en cause les résultats obtenus par Coyne et Bellier, d'autant que ceux-ci sont conservatifs [10]. Cependant EDF a décidé de vérifier dans quelle mesure leur amélioration pouvait avoir une influence sur les résultats. C'est la raison pour laquelle un modèle dit "réaliste" a été développé conjointement par EDF (SEPTEN/DS, EV2, lot n° 3) et Séchaud et Metz.

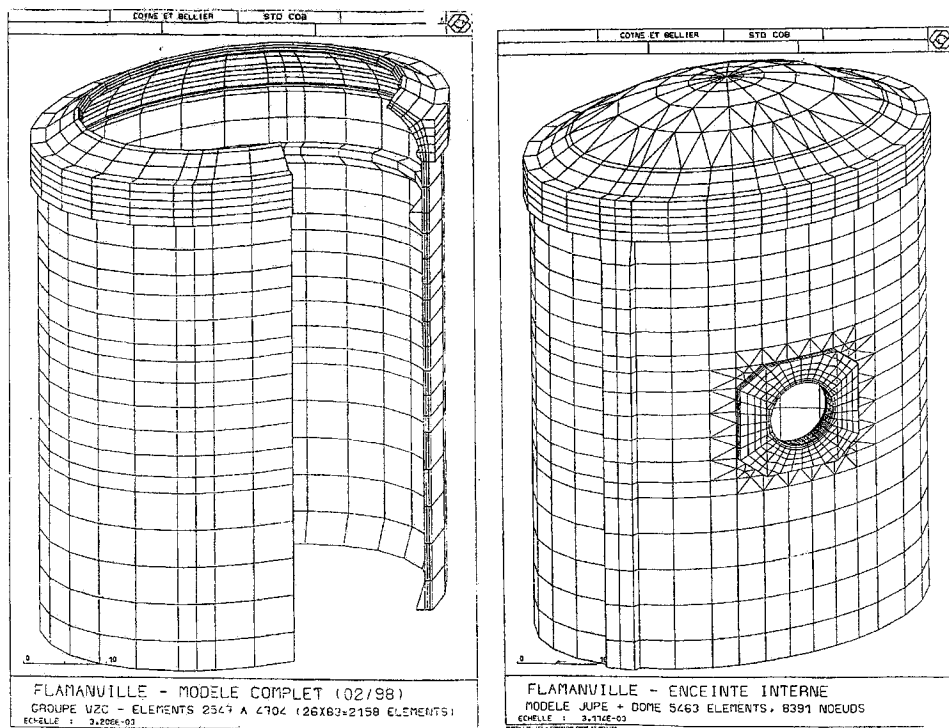
Il faut enfin aussi souligner qu'EDF a répondu à une demande du Groupe Permanent des Experts du 29.11.2001 (demande D010) [16]. L'étude conduite par Coyne et Bellier pour apporter une réponse a confirmé la validité des calculs conduits dans le cadre du projet EV1, en particulier dans la partie basse de la paroi interne.

Préparation des VD2 des enceintes à double paroi
Analyse du comportement mécanique de la paroi interne de l'enceinte de confinement



Palier P4 – Flamanville – Maillage des câbles de précontrainte

Préparation des VD2 des enceintes à double paroi
Analyse du comportement mécanique de la paroi interne de l'enceinte de confinement



Palier P4 - Flamanville - Maillage du modèle aux éléments finis

5.1.2 Modèle d'EDF et Séchaud et Metz (projet EV2, lot n° 3)

Dans la mesure où le modèle "réaliste" devait être plus précis et donc plus fin, il n'a pas été possible de modéliser l'ensemble de la structure compte tenu des moyens informatiques disponibles et des temps de calcul générés [10].

Par conséquent, EDF a choisi de se concentrer sur la partie basse de l'ouvrage (gousset), zone sur laquelle l'Autorité de Sûreté Nucléaire avait émis plusieurs demandes à la suite du Groupe Permanent des Experts du 29.11.2001.

Le but était de mettre en application industrielle certaines fonctionnalités nouvelles de Code_Aster (modélisation intégrée des câbles de précontrainte et du fluage en particulier), mais aussi d'évaluer le degré de conservatisme des études de Coyne et Bellier, ainsi que l'influence respective des données d'entrée (déformations différées, module d'Young du béton, ...).

Cette modélisation plus réaliste de la partie basse de l'ouvrage a mis en évidence :

- que raffiner le maillage révélait les ondes de flexion qui n'apparaissaient pas sur le modèle de Coyne et Bellier, et que la hauteur tendue était réduite par rapport à celui-ci,
- qu'introduire une loi de fluage se traduisait par des valeurs de déformation plus faibles que celles de Coyne et Bellier, tout en restant cohérent avec les valeurs mesurées par EDF-DTG,
- que modéliser les câbles dans le même modèle que la structure a permis de mieux appréhender les pertes de précontrainte sans les surestimer.

Cependant, aucune des conclusions de cette étude EV2 ne remet en cause la validité des résultats produits par Coyne et Bellier dans le cadre de EV1. Elles confortent plutôt leur caractère conservatif.

Préparation des VD2 des enceintes à double paroi
Analyse du comportement mécanique de la paroi interne de l'enceinte de confinement

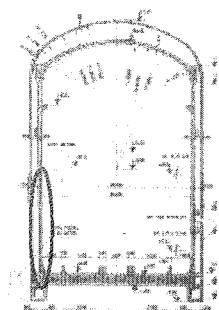


Fig. 4. – Location Of The Realistic Model On A Containment Vessel Section

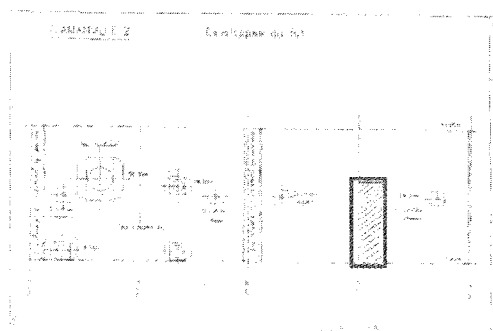


Fig. 5 – Location Of The Realistic Model On The Cask Projection

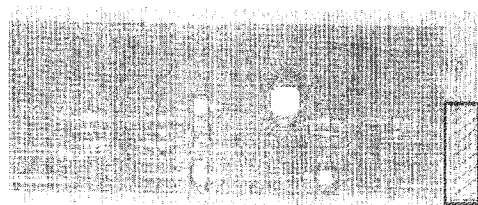


Fig. 6 – Location Of The Realistic Model On A Cask Cable Layout Projection

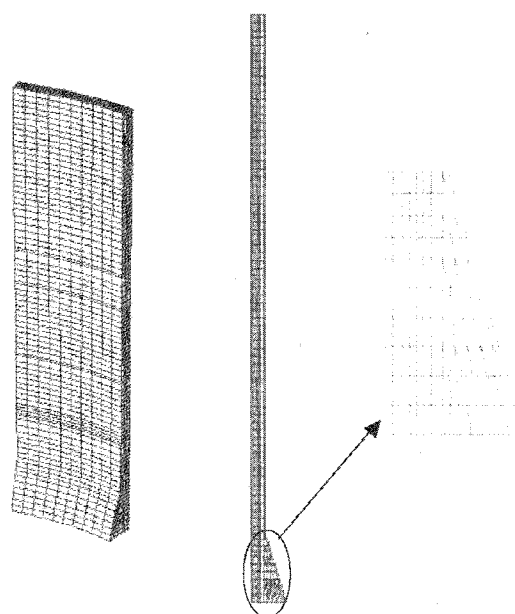


Fig. 7 – Views Of The Realistic Model

P4 - Flamanville - Modèle réaliste développé dans le cadre du projet EV2, lot n° 3

5.1.3 Conclusion

L'amélioration du réalisme du modèle aux éléments finis, ainsi que son raffinement, ne nous semble pas de nature à faire évoluer la stratégie d'EDF concernant la définition des zones à revêtir, ni à mettre en évidence de nouvelles zones tendues qui pourraient conduire à des fuites.

En revanche, elle permettra grâce à son raffinement de mettre en évidence une extension ou une diminution des zones déjà identifiées. Le modèle réaliste déjà mis en oeuvre au niveau du gousset montre que l'approche de Coyne et Bellier est de nature conservative [10] ce qui milite pour la poursuite du développement d'un modèle réaliste pour d'autres zones de structure afin d'identifier des marges sur les zones à revêtir.

Préparation des VD2 des enceintes à double paroi
Analyse du comportement mécanique de la paroi interne de l'enceinte de confinement

5.2 Evolution liée aux paramètres influents

5.2.1 Déformations différées

Evolution liée aux phénomènes physiques

Les phénomènes de retrait et de fluage sont globalement amortis sur l'ensemble des tranches des enceintes à double paroi, et ce depuis plusieurs années. Cet amortissement se poursuit pour les tranches les plus jeunes. Il n'existe pas à ce jour sur le parc de phénomène d'augmentation inattendue de la cinétique après une phase d'amortissement.

Par ailleurs, la littérature ne fait pas état de telles situations si nous excluons les phénomènes de nature pathologique (alcaliréaction, réactions sulfatiques, ...) ou ceux liés à une modification significative du chargement de la structure.

Evolution liée aux méthodes de prévision à long terme

Les études de Coyne et Bellier (projet EV1) se sont appuyées sur les valeurs de déformations différées fournies par EDF-DTG qui ont été extrapolées à 40 ans de fonctionnement de manière statistique sans prendre en compte un modèle de retrait et de fluage tiré de la littérature scientifique.

Cette manière de procéder n'a pas été remise en cause par l'Autorité de Sûreté Nucléaire lors du Groupe Permanent des Experts du 29.11.2001, dans la mesure où les cinétiques d'évolution des déformations différées de retrait et de fluage sont, sur la plupart des sites, très amorties.

EDF a cependant décidé d'étudier la validité d'une méthode dite "méthode fiabiliste" plus élaborée incorporant à la fois les mesures de déformations acquises tout au long de la vie de l'ouvrage, ainsi qu'un modèle de retrait et de fluage. Au delà du parc, le projet EPR pourra en bénéficier.

Les premiers résultats d'études permettent de considérer que cette méthode est valide. Il ne semble pas qu'ils soient la source d'une remise en cause des estimations annoncées dans le cadre du projet EV1 par Coyne et Bellier. Les résultats respectifs varient tout au plus dans la bande d'incertitude affectée aux mesures réalisées.

Les études [14] et [15] ont permis d'évaluer positivement : d'une part les conditions de sa mise en œuvre industrielle (étude de faisabilité) [14], et d'autre part sa capacité de prévision à long terme en conduisant un exercice sur les paliers CP0 et CPY (prévision d'une partie des mesures de déformations masquées pour l'exercice).

5.2.2 Module d'Young du béton

La littérature scientifique est unanime sur ce point. Le module d'Young ne peut que s'améliorer avec le temps, à condition de ne pas avoir soumis la structure à des efforts qui l'auraient endommagée (fissuration du béton, plastification des aciers).

La diminution apparente du module d'Young rencontrée sur Flamanville est liée à sa méthode de calcul et non au matériau lui-même (influence de la recouvrance de fluage sous l'action de la décompression des sections de béton lors des épreuves et de leurs paliers).

Par conséquent, le module d'Young de la structure ne peut pas être dans le temps une source d'évolution négative pour le comportement mécanique de la structure.

Préparation des VD2 des enceintes à double paroi
Analyse du comportement mécanique de la paroi interne de l'enceinte de confinement

Sous des contraintes normales d'une durée d'application inférieure à 24 heures, on admet, à défaut de mesures, qu'à l'âge de j jours, le module de déformation longitudinale instantanée du béton E_{ij} est égal à :

$$E_{ij} = 11\,000 f_{cj}^{1/3}$$

f_{cj} (exprimé en MPa) désignant la résistance caractéristique à la compression à j jours.

BAEL91, article A.2.1.2.1 – Variation du module d'Young du béton en fonction du temps

5.2.3 Caractéristiques du sol

Sauf en cas de modification importante des conditions hydrogéologiques au droit des sites, il ne nous semble pas que le sol soit une source d'évolution ultérieure du comportement mécanique de la structure, même si celui-ci pilote en grande partie le fonctionnement de la partie basse de l'ouvrage.

5.3 Comportement du béton

5.3.1 Autocontraintes

Le terme "autocontrainte" doit s'entendre dans le sens où l'ouvrage est soumis à des contraintes qui n'ont pas pour origine un chargement de la structure, mais plutôt un phénomène physique lié au comportement du matériau dans le temps.

Dans le cadre de notre étude, les phénomènes physiques à l'origine de ces autocontraintes peuvent avoir 2 origines :

- la non linéarité du gradient thermohydrique dans l'épaisseur de la paroi,
- ou
- un retrait différentiel entre 2 éléments de structure en béton.

5.3.1.1 Non linéarité du gradient thermohydrique

Dans le cadre du lot n° 8 du projet EV1, avait été conduite une étude réalisée par le LCPC afin d'identifier si le séchage différentiel du béton pouvait être à l'origine du développement d'une fissuration de parement (différence de cinétique de séchage entre le parement et le cœur de la paroi, non linéarité du gradient thermohydrique) [11].

Cette étude s'était appuyée sur un modèle aux éléments finis basés sur le code CESAR développé par le LCPC pour la zone courante du fût. Elle traitait le cas de Flamanville et intégrait l'historique de l'ouvrage (épreuve, retrait, fluage, pertes de précontrainte), jusqu'à 40 ans de fonctionnement.

Les résultats ont montré que pouvait effectivement se révéler une fissuration du parement, mais que celle-ci n'évoluait qu'au cours des premières années de vie de l'ouvrage (avant 5 ans) et sur une profondeur limitée à une dizaine de centimètres de part et d'autre de la paroi.

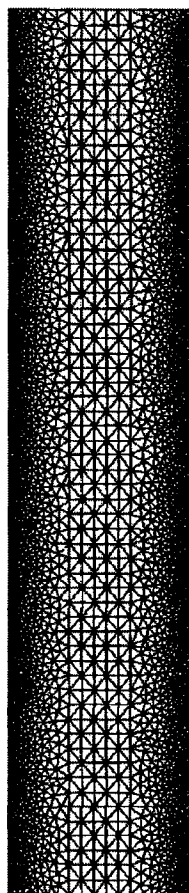
Au delà de 5 ans, la fissuration liée au séchage différentiel n'évolue plus de manière sensible.

Dans le cas de la paroi interne de l'enceinte de confinement, nous sommes en présence d'un ouvrage qui a un âge supérieur à 15 ans pour les paliers P4 et P'4, et 10 ans pour le N4, ce

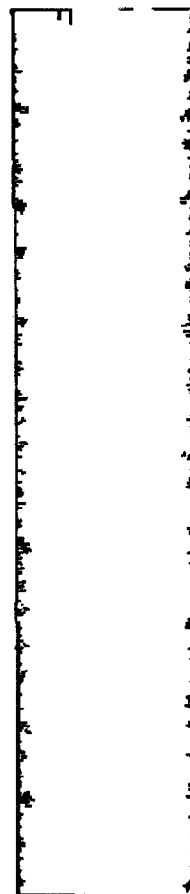
Préparation des VD2 des enceintes à double paroi
Analyse du comportement mécanique de la paroi interne de l'enceinte de confinement

qui est bien au delà de la limite des 5 ans annoncée par le LCPC. Par conséquent, une évolution du comportement de l'ouvrage ne peut être attendue du seul fait du phénomène de séchage différentiel.

En revanche, si cette fissuration est couplée à une fissuration d'origine mécanique apparue à l'occasion d'une épreuve précédente, alors il convient de prendre les mêmes précautions que celles qui sont décrites dans le paragraphe relatif aux conséquences induites par la fatigue liée à la réalisation répétée d'épreuves.



Vue des éléments du modèle aux éléments finis



Fissuration calculée

Coupe en élévation de la paroi du fût modélisée par le LCPC (modèle axisymétrique d'une portion courante du fût)

5.3.1.2 Retrait différentiel entre 2 éléments de structure en béton

Le bétonnage d'un ouvrage de taille importante dont les éléments constitutifs sont massifs du point de vue de leurs épaisseurs requiert des précautions particulières lors de sa construction pour éviter l'apparition de contraintes liées, à la prise et au séchage du béton, qui peuvent être suffisamment fortes pour aboutir à une fissuration (bétonnage par plots, traitement des surface de reprise).

Ces contraintes ont pour origine un retrait différentiel induit par le retrait thermique et de dessiccation du béton entre 2 zones de structure d'épaisseur similaire mais coulées à des instants différents.

Préparation des VD2 des enceintes à double paroi
Analyse du comportement mécanique de la paroi interne de l'enceinte de confinement

Ce phénomène de retrait différentiel existe aussi à la jonction de zones d'épaisseur plus forte raccordées à des zones d'épaisseur plus faible (retrait de dessiccation). Ceci est le cas en particulier au droit du gousset ou de la sous ceinture torique (cas de Golfech 2 identifié lors de la préparation de la VD1 en 2004 et sur laquelle porte une étude en cours au CIPN), voire de la console du pont polaire.

Si 2 éléments en béton d'épaisseurs significativement différentes appartiennent à une même zone de structure, alors le retrait de dessiccation va se faire plus rapidement sur l'élément le moins épais induisant ainsi à leur jonction des autocontraintes.

Cependant, ce phénomène n'est pas aujourd'hui détecté par la modélisation aux éléments finis de la structure réalisée dans le cadre du projet EV1 (études Coyne et Bellier).

Si une fissuration a effectivement eu lieu lors de la construction, elle peut cependant avoir été traitée sur le chantier par une injection, et de plus avoir été ultérieurement refermée par la mise en précontrainte de l'ouvrage.

Sachant que des pertes de précontrainte se développent au fil du temps, il est envisageable que ces fissures réapparaissent plusieurs années plus tard (malgré une injection initiale, surtout si elle n'a pas été réalisée avec un produit de nature à ponter les fissures occasionnées).

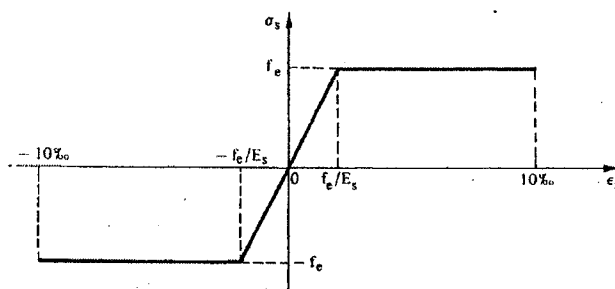
L'impact de ce phénomène peut être évalué par exemple par une étude du dossier de réalisation (séquencement des plots de bétonnage, volumes des plots, composition du béton, qualité du produit d'injection éventuel), complétée le cas échéant par une inspection du parement de l'ouvrage au droit des zones les plus sensibles de ce point de vue.

Cette note ne conclura donc pas sur cet aspect, mais recommande une analyse particulière de ce phénomène, qui couplée aux autres conclusions de cette note constituera un faisceau de présomptions complémentaire de nature à définir de nouvelles zones à revêtir avant la VD2 des tranches si cela s'avère nécessaire.

5.3.2 Fragilité

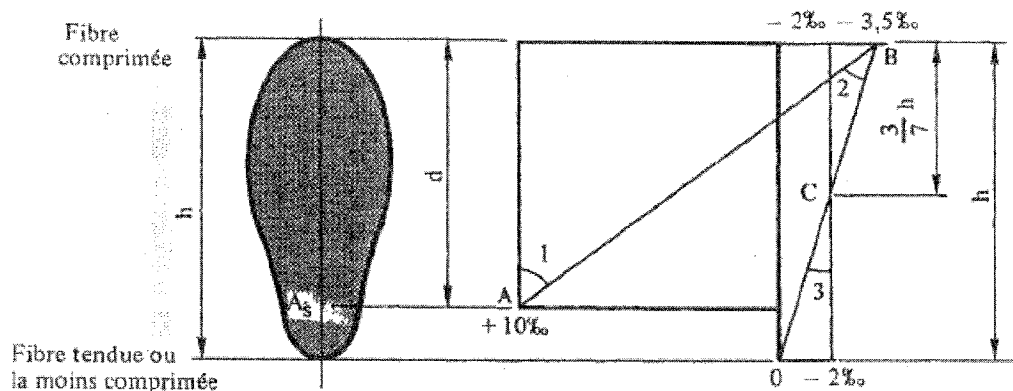
Si nous comparons le béton à d'autres matériaux utilisés dans le cadre de la construction de bâtiments industriels, le béton présente la particularité d'être fragile dans la mesure où son domaine de déformation plastique est relativement limité par rapport à l'acier par exemple.

Ce phénomène est traduit règlementairement dans le BAEL91, où le béton ne doit pas dépasser une déformation de l'ordre de 3.5 ‰ (en compression, puisqu'en traction il n'est pas supposé résister) contre 10 ‰ pour l'acier.



BAEL 91 – Article A.2.2.2 – Diagramme (ϵ_s , σ_s) de l'acier

Préparation des VD2 des enceintes à double paroi
Analyse du comportement mécanique de la paroi interne de l'enceinte de confinement



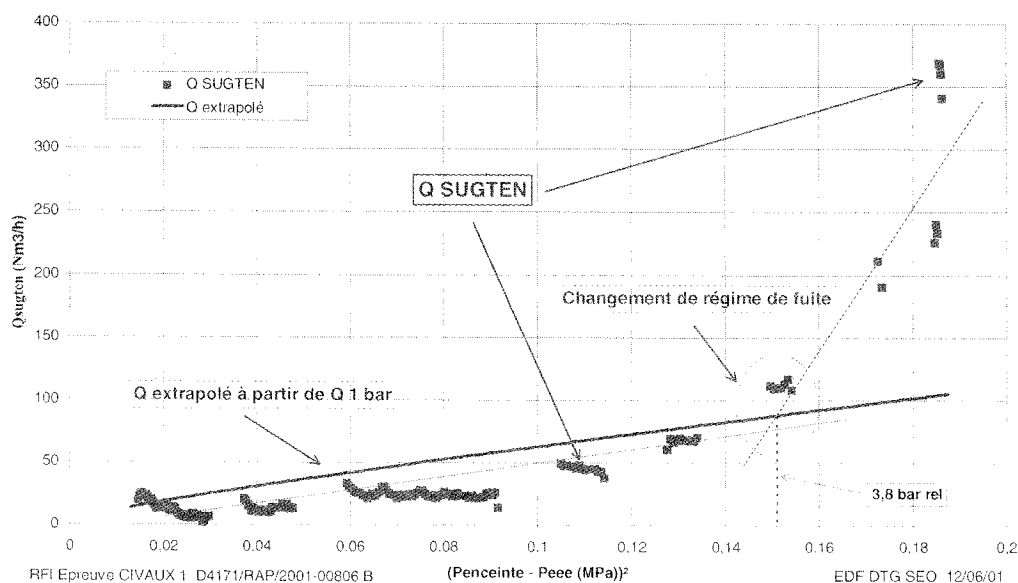
BAEL91, article A.4.3.3 - Déformations limites fixées pour les matériaux (acier et béton)

Le fait de coupler le béton à des armatures en acier permet aux structures de mieux résister aux efforts de traction et d'augmenter leur palier de déformation plastique (en particulier en traction).

Les ouvrages du parc nucléaire doivent cependant aussi assurer une fonction d'étanchéité. Par conséquent, il se peut que cette fragilité se traduise au droit de certaines zones tendues par un effet "falaise" sur la valeur du débit de fuite local lorsque les contraintes de traction avoisinent la résistance à la traction du béton : la rupture en traction arrivant brutalement, le débit de fuite local augmente lui aussi brutalement.

Cela a pu être constaté sur Civaux 1 lors de l'épreuve de la visite complète initiale de juin 2001, comme l'atteste la figure suivante. Cette figure décrit en fonction de la pression, l'évolution du débit de fuite global. A 0.38 MPa rel., nous notons une nette augmentation du débit de fuite global due à l'ouverture de fissures essentiellement situées dans la zone périphérique du tampon de l'accès matériel. Ce schéma traduit bien l'influence potentielle de la fragilité du matériau sur l'évolution du débit de fuite.

**Epreuve enceinte CIVAUX 1 - Gonflage SUGTEN
1 bar - 4,3 bar**



N4 - Civaux 1 - Epreuve VC1 de juin 2001 - Résultats de SUGTEN à la montée en pression

Préparation des VD2 des enceintes à double paroi
Analyse du comportement mécanique de la paroi interne de l'enceinte de confinement

Il faut maintenant se demander s'il existe de telles zones dans la structure de nos ouvrages (en dehors de celle autour du tampon de l'accès matériel qui est systématiquement revêtue).

Les zones potentiellement concernées sont toutes celles qui présentent une traction traversant toute l'épaisseur de la paroi. Le risque sera d'autant plus important que la valeur de la contrainte sera proche de celle de la limite de résistance en traction du béton.

Nous faisons ici l'hypothèse que si la contrainte moyenne reste une compression, cela constitue un écran suffisant pour limiter l'augmentation du débit de fuite.

Nous ne pouvons pas en revanche exclure les zones ne présentant pas d'évolution de leur contrainte de traction dans le temps car compte tenu du phénomène de fragilité une évolution même minime des contraintes peut entraîner une rupture.

Dans les paragraphes précédents de cette note, nous avons analysé le comportement mécanique de la paroi interne de l'enceinte de confinement en examinant les résultats des calculs menés par le bureau d'études Coyne et Bellier dans le cadre du projet EV1.

Il ressort de cette analyse faite sur un plan relativement général (et non au cas par cas) que la zone du gousset répond aux conditions précédentes car sa contrainte moyenne horizontale est une traction dont la valeur peut avoisiner la valeur de la résistance à la traction du béton.

Jusqu'à ce jour, nous n'avons cependant pas identifié de débit de fuite suffisamment important pour justifier des travaux de revêtement (voir résultats de EDF-CEMETE chargé de réaliser les mesures de débits de fuite locaux).

5.3.3 Fatigue liée aux épreuves

Une analyse bibliographique a été conduite par EDF R&D [5]. Cette analyse rappelle le résultats d'essais réalisés sur des tirants en béton armé soumis à une succession de mises en traction aboutissant à leur fissuration.

Le constat suivant a été fait. Dès lors qu'une fissuration apparaît dans un tirant, celle-ci évolue progressivement d'essai en essai, les fissures s'ouvrent de plus en plus. L'impact de la fatigue peut se faire sentir même avec un nombre de cycles réduit comme c'est le cas pour le nombre total d'épreuves que peut subir un ouvrage tout au long de sa vie.

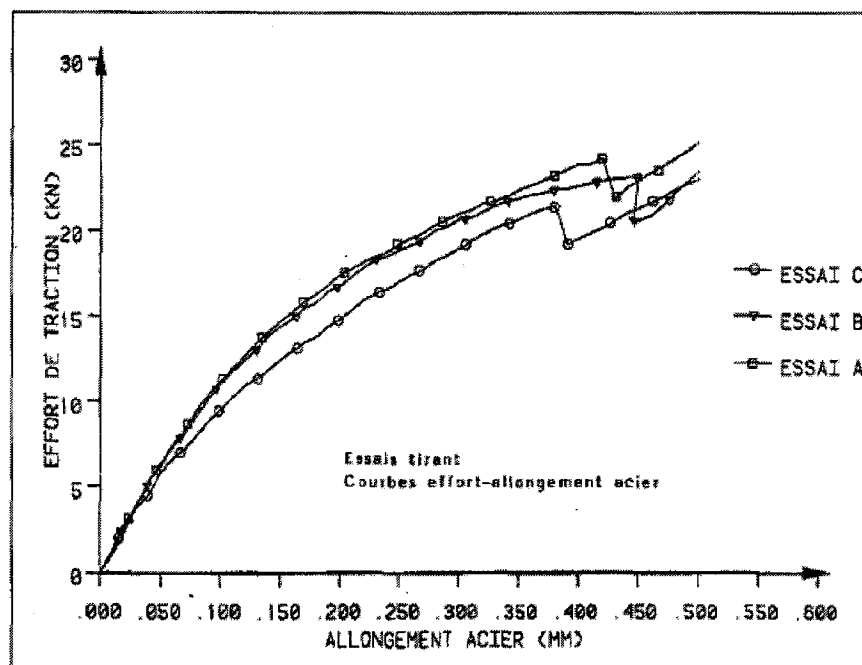
Préparation des VD2 des enceintes à double paroi
Analyse du comportement mécanique de la paroi interne de l'enceinte de confinement

Figure n°7 : Courbe Effort allongement d'essais de tirant d'après [Clément 1987]

Les résultats de ces essais donnent une courbe allongement des aciers - effort de traction que l'on peut décomposer en quatre parties (Figure n°7) :

- une première partie non fissurée où la rigidité est importante ;
- une zone non linéaire qui résulte de la dégradation de l'interface acier-béton ;
- une chute brutale de l'effort due à la fissuration du béton ;
- ensuite un comportement quasi élastique qui représente principalement la rigidité des aciers.

A partir de ces résultats d'essais nous pouvons faire un parallèle avec la structure de nos ouvrages. En épreuve, cette structure est soumise en fonction des zones observées :

- à de la compression, en général il s'agit des zones courantes (fût, dôme),
- ou à de la traction partiellement ou totalement dans l'épaisseur de la paroi, il s'agit alors de zones dites singulières (tampon de l'accès matériel, ceinture torique, gousset).

Pour les zones restant totalement comprimées, il n'existe évidemment a priori aucun risque particulier pour qu'un phénomène de fissuration n'apparaisse et qu'un phénomène de fatigue ne se développe.

En revanche pour les zones soumises à une mise en traction partielle (intrados ou extrados seulement) ou traversante, il faut distinguer plusieurs cas de figure en fonction de l'existence avérée ou non d'un réseau de fissures.

Deux cas se présentent alors :

- malgré la mise en traction de la zone concernée, il n'existe pas de réseau de fissures mis en évidence que ce soit à l'occasion des épreuves ou même en fonctionnement normal. Dans ce cas compte tenu du fait que les phénomènes évolutifs (retrait, fluage, pertes de

Préparation des VD2 des enceintes à double paroi
Analyse du comportement mécanique de la paroi interne de l'enceinte de confinement

précontrainte) sont amortis, il y a peu de risque pour que ces zones se dégradent ultérieurement, au moins jusqu'à la prochaine VD2 (sauf dans certains cas particuliers comme celui de Civaux 1 où la vitesse d'évolution des déformations différées est encore soutenue),

- si un réseau de fissures (débitantes ou non) a été mis en évidence, alors il est envisageable qu'une évolution de cette fissuration s'avère au cours des épreuves suivantes sans qu'il soit possible de dire si elle occasionnera ou non un débit de fuite.

Il faudrait dans ce dernier cas exploiter les relevés de fissuration lorsqu'ils existent (voire les réaliser s'ils n'existent pas), à l'intrados comme à l'extrados.

Coupler l'analyse de cette cartographie des fissures à celle des résultats de calculs de Coyne et Bellier permettrait de mettre en évidence les zones où nous constatons simultanément :

- de la traction (en intrados, en extrados ou traversante),
- un réseau de fissures existant (débitantes ou non).

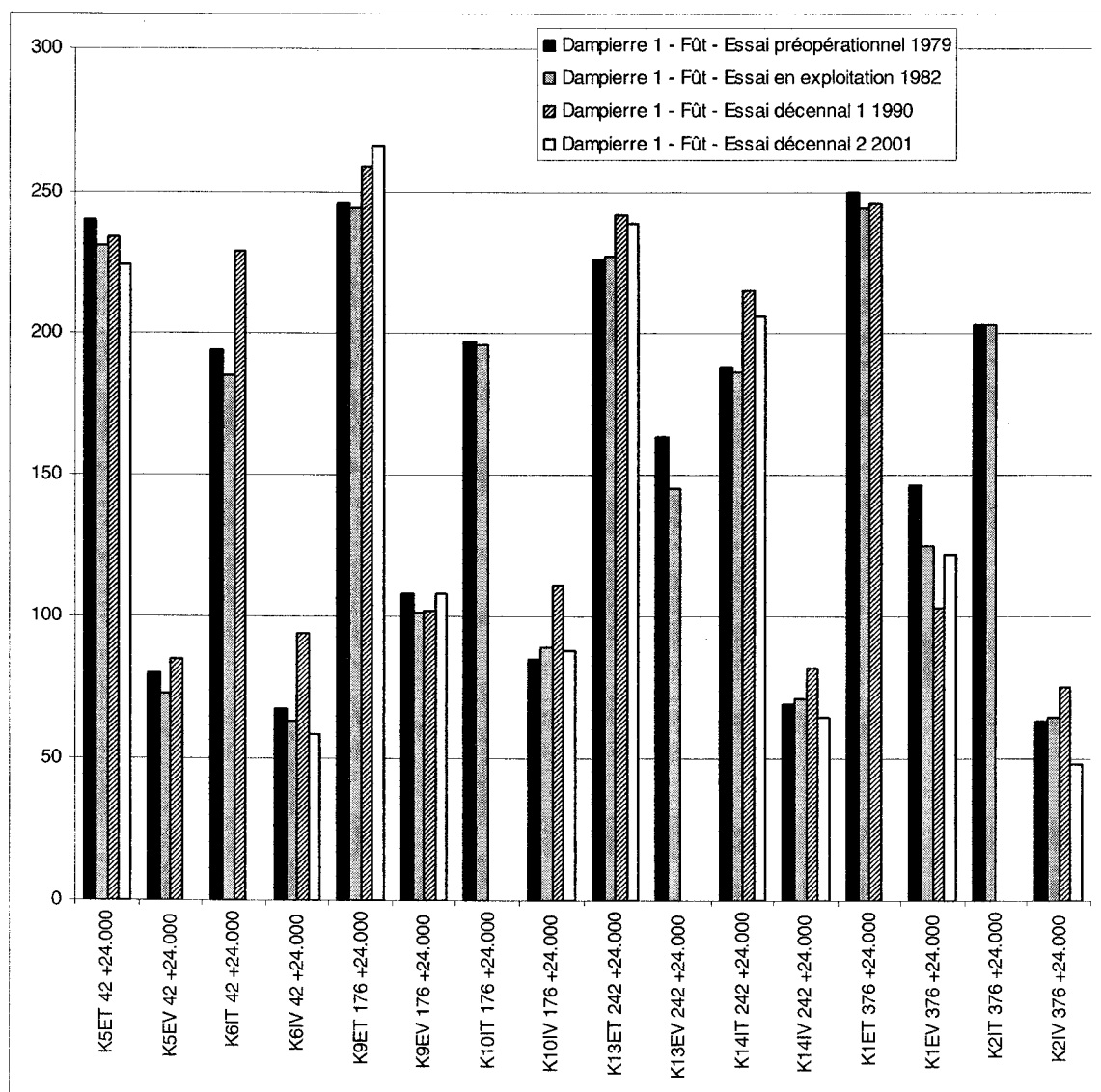
Les zones où ces 2 conditions seraient réunies pourraient être une source ultérieure de fuite. Le risque serait potentiellement accru dans le cas où le réseau de fissures a été débitant lors d'une épreuve précédente, et le serait plus encore si le béton est de qualité moyenne (cas des granulats de faible résistance mécanique de Civaux 1 par exemple).

Il faut noter que la zone la plus sensible de ce point de vue est celle du tampon de l'accès matériel (zone de mise en traction concomitante à un réseau de fissures débitantes). Le risque de fuite y est cependant neutralisé dans la mesure où EDF a décidé de revêtir l'ensemble des tranches avant les VD2.

Pour relativiser les propos précédents, les graphiques suivants nous permettent cependant de constater que nous ne notons pas, en exploitant le dispositif d'auscultation de l'ouvrage, de variation importante des déformations mesurées d'une épreuve à l'autre, et en particulier pour les tranches 900 MWe qui en ont subi le plus par rapport aux enceintes à double paroi, objet de cette note, et pour lesquelles nous pouvons nous attendre à un comportement similaire. Nous pouvons en déduire que l'impact d'épreuves répétées est faible sur le plan du comportement mécanique.

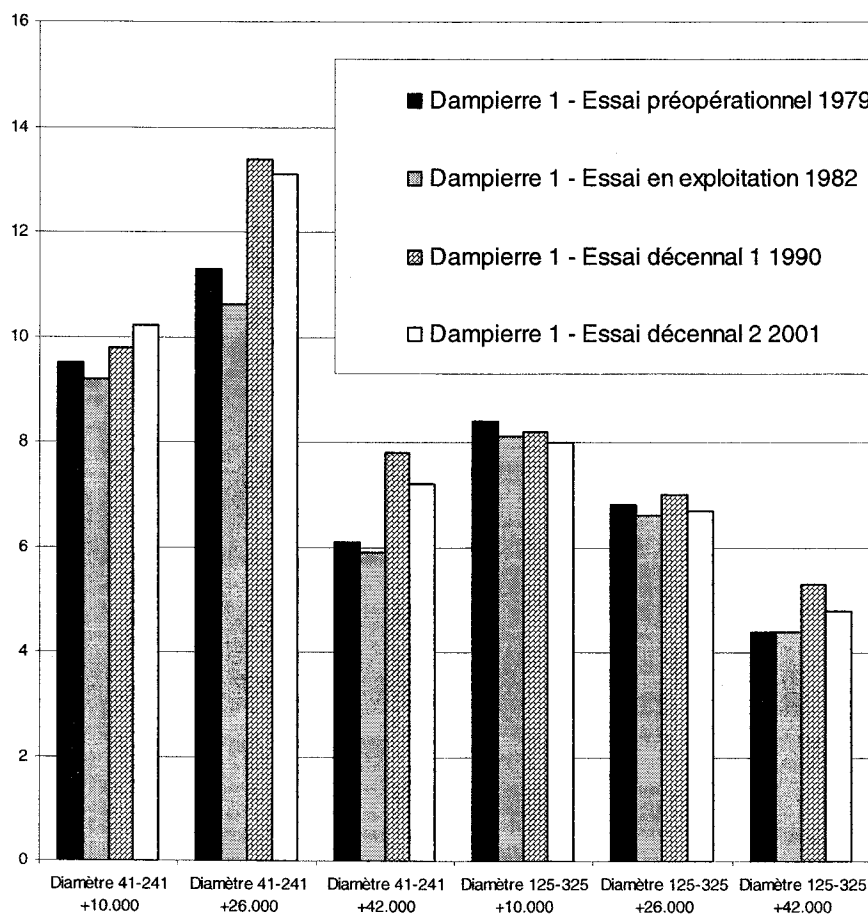
Cependant, ces graphiques ne nous permettent pas de conclure quant à ce qu'aurait été l'évolution du taux de fuite de ces tranches si elles n'avaient pas comporté un liner métallique.

Préparation des VD2 des enceintes à double paroi
Analyse du comportement mécanique de la paroi interne de l'enceinte de confinement



Dampierre 1 – Evolution des déformations à la pression nominale d'épreuve en épreuve (mi-fût, en $\mu\text{m}/\text{m}$)

Préparation des VD2 des enceintes à double paroi
Analyse du comportement mécanique de la paroi interne de l'enceinte de confinement



Dampierre 1 – Evolution du diamètre à la pression nominale d'épreuve en épreuve (en mm)

6. Travaux complémentaires de revêtement

6.1 Evolution des zones tendues revêtues

Dans le cas où des évolutions mécaniques se produiraient au droit des zones déjà revêtues (tampon de l'accès matériel, certains goussets), nous estimons que les marges inhérentes à la démarche adoptée par EDF pourraient couvrir les conséquences potentielles.

Les risques de conséquences sur le taux de fuite sont faibles dans ce cas.

6.2 Evolution des zones tendues non revêtues

Nous avons vu que le béton présentait certaines particularités. Son retrait et son fluage fort au jeune âge sont maintenant quasiment amortis sur l'ensemble des tranches sauf dans certains cas particuliers comme Civaux 1. Il y a donc peu d'évolution à attendre de ce point de vue.

Le phénomène de fatigue n'a pas été mis en évidence à ce jour, même sur le parc 900 MWe où certains ouvrages ont déjà subi 4 épreuves.

Préparation des VD2 des enceintes à double paroi
Analyse du comportement mécanique de la paroi interne de l'enceinte de confinement

Les autocontraintes ayant pour origine un séchage différentiel dans l'épaisseur de la paroi ne peuvent être à l'origine d'évolutions futures dans la mesure où le phénomène se stabilise rapidement après la construction dans les 5 ans environ.

Le béton est aussi un matériau fragile, bien qu'il présente une résistance à la traction, il peut se dégrader dans les zones où il est tendu à un niveau de contrainte proche de sa contrainte limite de traction. Et en particulier, dans les zones où il est tendu sur toute l'épaisseur de la paroi (gousset).

Les zones où un retrait différentiel peut avoir une influence sont situées au droit des changements de raideur (gousset, ceinture torique). Si des précautions particulières n'ont pas été prises à la construction, alors des défauts (masqués par la précontrainte ou une injection de fissure) peuvent se révéler au fil du temps à cause des pertes de précontrainte.

Finalement, il apparaît que la zone du gousset combine un certain nombre de paramètres pouvant conduire à son évolution mécanique (fragilité du matériau, mise en traction dans l'épaisseur, retrait différentiel). La zone de la ceinture torique est moins évolutive a priori car le faisceau de facteurs d'évolution y est plus restreint.

6.3 Emergence de nouvelles zones tendues

La mise en évidence par le calcul de nouvelles zones tendues, qui ne l'auraient pas été lors des études conduites par le bureau d'études Coyne et Bellier dans le cadre du projet EV1, nous paraît peu probable, dans la mesure où il nous semble que le modèle est suffisamment fin et qu'il les aurait déjà détectées.

Si cependant ce n'était pas le cas, nous estimons que ces zones seraient a priori de faible étendue (de largeur correspondant à la taille des éléments du modèle aux éléments finis, et inférieures à une centaine de m²⁵), et de contrainte limitée (a priori inférieure à la limite en traction du béton).

6.4 Evaluation de la nécessité de réaliser des travaux complémentaires

Les analyses de cette note mettent en évidence les sources potentielles de zones où un complément de revêtement pourrait être envisagé.

Cependant compte tenu de la complexité du fonctionnement mécanique du béton armé précontraint, il convient d'adosser nos conclusions relatives aux résultats de calculs au retour d'expérience dont nous disposons afin de proposer une sélection de zones où il serait vraisemblable qu'à terme des fuites puissent se développer et évoluer dans le temps au fil des différentes épreuves à venir.

Pour cela, nous avons choisi d'étudier plus particulièrement le cas de Civaux 1 qui est sans doute le plus pénalisant de l'ensemble du parc nucléaire pour les raisons que nous avons évoqué dans la note [12] (béton de qualité moyenne à cause des granulats, déformations différées importantes et non amorties, partie basse rigide amplifiant sa mise en traction). Sur ce cas sont a priori amplifiés tous les problèmes potentiels auxquels nous pourrions être confrontés à l'avenir sur nos ouvrages.

En croisant l'analyse de Civaux 1 avec celle des calculs EV1 que nous avons menée précédemment, nous en déduisons les zones qui seraient candidates à un revêtement complémentaire éventuel à réaliser avant les VD2.

⁵ Taille approximative d'un demi-élément du modèle E.F. : 1.500 m, périmètre du fût : 130 mètres, surface max. émergente = $1.500 \times 130 / 2 = 100 \text{ m}^2$ (si l'on suppose que la traction n'apparaît qu'au droit de zones singulières et que leur zone d'influence se fait sentir sur la moitié de la périphérie)

Préparation des VD2 des enceintes à double paroi
Analyse du comportement mécanique de la paroi interne de l'enceinte de confinement

Analyse du cas de Civaux 1

Lors de l'épreuve de juin 2001, la paroi interne de l'enceinte de confinement de Civaux 1 a présenté un taux de fuite de 2.70 % (essais VCI) contre 0.38 % en décembre 1993 (essai préopérationnel).

Bien que nous nous attendions à une augmentation du taux de fuite, principalement à cause de la dégradation de la zone du tampon de l'accès matériel, il était inattendu que celui-ci atteigne ce niveau.

Cependant, la stratégie élaborée par EDF pour le choix des zones à revêtir n'a pas été mise en défaut. Elle a été appliquée sur Civaux 1 comme sur l'ensemble des autres tranches et a apporté satisfaction puisque le taux de fuite après ré-épreuve en novembre 2001 a été de 0.49 %.

Une cartographie des principales zones de fuite a été dressée lors de l'essai de juin 2001 grâce aux mesures faites par EDF-CEMETE (voir la figure suivante).

Les zones à risque mises en évidence à cette occasion sont les suivantes :

- la zone périphérique autour du tampon de l'accès matériel pour laquelle un revêtement est déjà prévu par EDF sur l'ensemble des tranches,
- la zone du gousset,
- la zone de la ceinture torique (et sous ceinture torique).

A titre indicatif, nous rappelons les résultats des mesures de fuites locales réalisées par EDF-CEMETE dans le tableau suivant. Il faut cependant utiliser et interpréter ces valeurs avec précaution car les mesures, bien que faites avec beaucoup de soin, ne sont pas exhaustives pour une zone, et il se peut que certaines fuites locales n'aient pas été comptabilisées. Cependant, ce tableau donne un bon aperçu de la répartition des fuites, en particulier pour apprécier la contribution relative des différentes zones.

Préparation des VD2 des enceintes à double paroi
Analyse du comportement mécanique de la paroi interne de l'enceinte de confinement

<u>GALERIE DE PRECONTRAINT</u> Débit total sur cette zone:	0 NI / h
<u>GOUSSET (de -3,00 à +3,80m)</u> Zone 300 - 0 - 100 GON Zone 100 - 200 - 300 GON Débit total sur cette zone:	1689 NI / h 26793 NI / h 28482 NI / h
<u>SOUS-CEINTURE TORIQUE</u> Zone 100 - 200 - 300 GON Zone 300 - 000 - 100 GON Débit total sur cette zone:	930 NI / h 390 NI / h 1320 NI / h
<u>T.A.M.</u> Tampon d'accès matériel Débit total sur cette zone:	181821 NI / h 181821 NI / h
<u>AUTRES ZONES:</u> Fût de +3,80 m à la sous-ceinture torique Traversées Débit total sur cette zone:	4393 NI / h 3355 NI / h 7748 NI / h
<u>DOME</u> Débit total sur cette zone:	1230 NI / h
Débit total identifié à ce palier:	220,601 Nm ³ / h

Epreuve de juin 2001 (avant revêtement)

Préparation des VD2 des enceintes à double paroi
Analyse du comportement mécanique de la paroi interne de l'enceinte de confinement

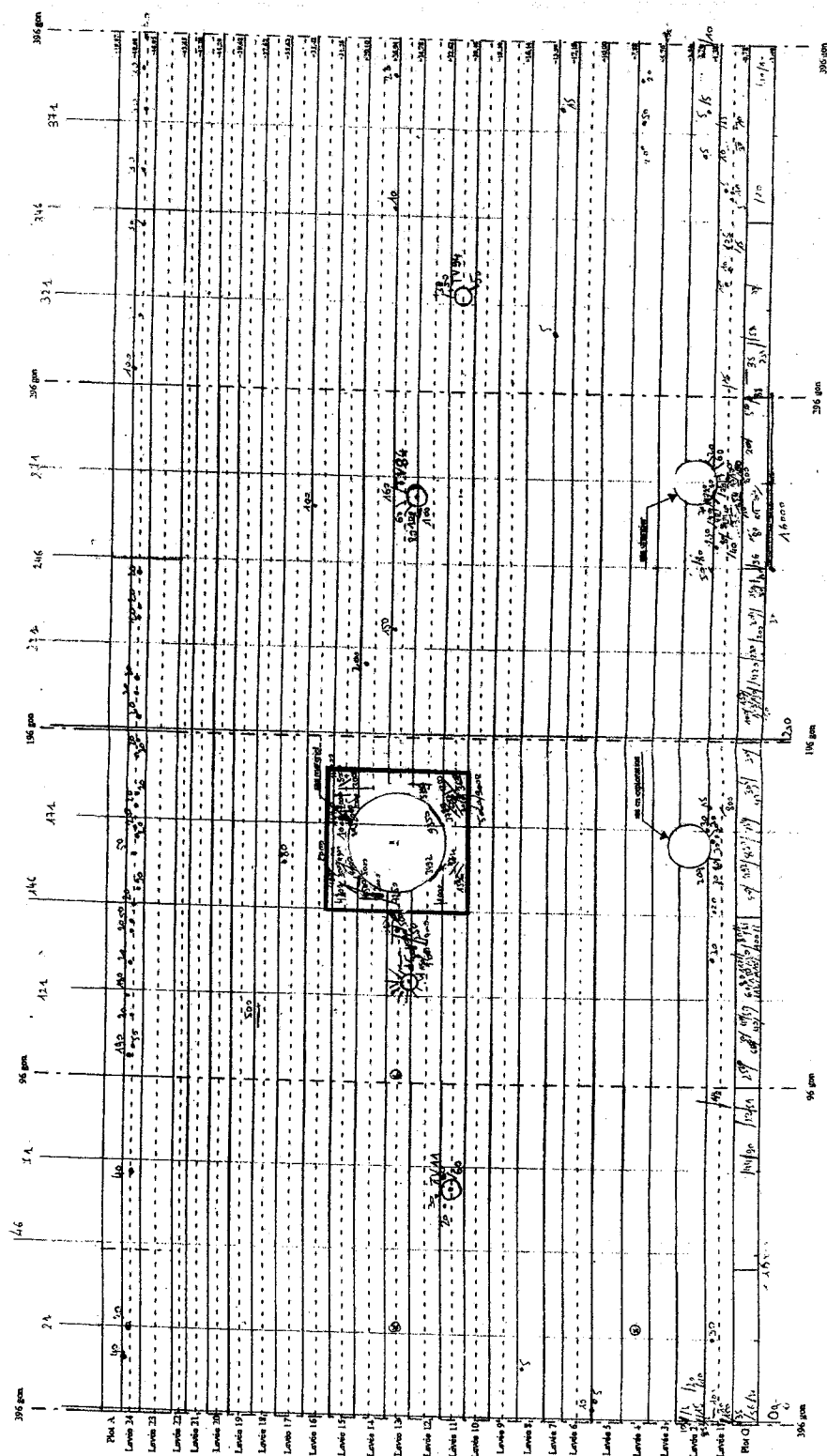
<u>GALERIE DE PRECONTRAINT</u> Débit total sur cette zone:	21 NI / h
<u>GOUSSET (de -3.00 à +7m)</u> Zone 300 - 0 - 100 GON Zone 100 - 200 - 300 GON Débit total sur cette zone:	558 NI / h 8595 NI / h 7153 NI / h
<u>SOUS-CEINTURE TORIQUE (de 45.80 à 48 m)</u> Zone 100 - 200 - 300 GON Zone 300 - 000 - 100 GON Débit total sur cette zone:	572 NI / h 482 NI / h 1054 NI / h
<u>L.A.M.</u> Tampon d'accès matériel Débit total sur cette zone:	14197 NI / h 14197 NI / h
<u>AUTRES ZONES:</u> Fût de +7 m à 42.25 m Débit total sur cette zone:	1738 NI / h 1738 NI / h
<u>DOME</u> Débit total sur cette zone:	179 NI / h
Débit total identifié à ce palier:	24342 NI / h

Epreuve de novembre 2001 (après revêtement)

Civaux 1 – Mesures de fuites locales en juin 2001 et novembre 2001

Préparation des VD2 des enceintes à double paroi
Analyse du comportement mécanique de la paroi interne de l'enceinte de confinement

CIVAUX 1 (intrados de la paroi interne)



Préparation des VD2 des enceintes à double paroi
Analyse du comportement mécanique de la paroi interne de l'enceinte de confinement

6.5 Zones complémentaires éventuelles à revêtir avant les VD2

Ce paragraphe a pour objet de proposer une sélection de zones où un revêtement complémentaire pourrait être mis en œuvre afin de limiter le risque d'une évolution ultérieure du taux de fuite lors des prochaines épreuves VD2, et au delà.

Compte tenu du fonctionnement mécanique complexe du béton précontraint, nous attirons l'attention sur le fait que cette proposition est exprimée sans que nous puissions être sûrs d'une évolution du taux de fuite en l'absence du revêtement complémentaire proposé ici.

En revanche le bénéfice minimal attendu sur chaque tranche grâce à ce revêtement complémentaire peut être chiffré à partir du relevé des débits de fuites locales, réalisé par EDF-CEMETE, qui seraient masqués par ce revêtement. La part d'évolution future n'est quant à elle pas quantifiable de manière fiable en l'état de nos connaissances.

Les zones susceptibles de nécessiter un revêtement complémentaire éventuel avant la VD2 sont les suivantes :

- en premier lieu, la zone du gousset qui est débitante du point de vue du retour d'expérience, et qui est tendue horizontalement dans toute l'épaisseur de la paroi selon les calculs EV1. Il s'agit selon nous de la zone qui a le potentiel d'évolution future des fuites le plus important,
- en second lieu, la zone de la ceinture torique (et sous ceinture torique), qui est débitante du point de vue du retour d'expérience, mais reste en moyenne en compression selon les calculs EV1 (malgré une traction à l'extrados). Le potentiel d'évolution future des fuites est selon nous plus faible que celui du gousset.

D'une manière générale tout point débitant mesuré en dehors de ces zones et dont le revêtement peut apporter un bénéfice significatif serait à revêtir.

Une analyse technico-économique préalable devra être conduite avant de prendre la décision de revêtir telle ou telle zone afin de bénéficier du ratio fuite masquée / surface revêtue le plus important.

En fonction des résultats de cette analyse technico-économique, il pourra s'avérer plus intéressant selon le retour d'expérience de revêtir le gousset ou la ceinture torique. Cependant le risque potentiel d'évolution nous semble plus élevé dans la zone du gousset, même si dans certains cas la zone de la ceinture torique (et sous ceinture torique) peut apparaître plus débitante que celle du gousset d'après le retour d'expérience.

7. Conclusion

Nous rappelons que cette note n'analyse que le comportement mécanique de l'ouvrage décrit par les calculs qui ont été conduits par le bureau d'études Coyne et Bellier dans le cadre du projet EV1. Ces calculs ont servi à définir l'étendue et la localisation des zones de l'ouvrage à revêtir.

Ils ont cependant été analysés à la lumière du retour d'expérience du parc nucléaire (relevé de fuites locales par EDF-CEMETE, cas de Civaux 1, ...) et des résultats du modèle dit "réaliste" élaboré dans le cadre du projet EV2 (lot n° 3).

Il y aura lieu de compléter et d'enrichir cette analyse par des études relatives à l'examen du dossier de construction des ouvrages (procédures de réalisation sur le chantier, composition des bétons, problèmes rencontrés lors de la construction, ...), et par des études prospectives sur l'impact de l'évolution de certains paramètres (perméabilité, microfissuration diffuse, ...). Ces points ne sont pas abordés dans cette note.

Préparation des VD2 des enceintes à double paroi
Analyse du comportement mécanique de la paroi interne de l'enceinte de confinement

Les zones où un revêtement complémentaire serait à prévoir avant la VD2 sont répertoriées dans le paragraphe précédent. Ces zones sont proposées sans garantie ferme quant au gain futur que leur revêtement pourrait apporter, en revanche le gain minimal est quantifiable grâce au retour d'expérience des débits de fuites locales mesurés par EDF-CEMÉTÉ à l'occasion des épreuves précédentes.

Nous recommandons de prévoir un revêtement en priorité dans les zones où le risque potentiel d'évolution des fuites nous paraît le plus important (gousset), même dans le cas où le ratio fuite masquée / surface revêtue n'y est pas le plus fort par rapport à d'autres zones.

8. Suites à donner

Cette note solde la demande exprimée lors de la réunion téléphonique du 20.07.2004 [1].