



DIRECTION PRODUCTION INGENIERIE

SERVICE ÉTUDES ET PROJETS
THERMIQUES ET NUCLÉAIRES

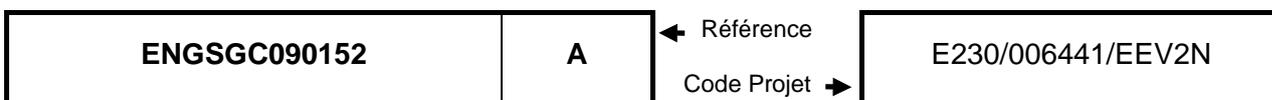
Diffusé le : Voir code barres ci-dessus

Entité émettrice: Division Génie Civil – Installation – Structures

Rédacteur : CREMIEUX D. – CONSTANS N. (stagiaire INSA) Nbre de pages : 50

Domaine d'application : P4, P'4 et N4 (hors §4 : P4 seulement) Nbre d'annexes : 3

Titre : **Amélioration de l'étanchéité des enceintes à double paroi – Etude comparative multicritère des parades**



Type de document : **Note**

Mots clés : Enceinte à double paroi – précontrainte additionnelle – étanchéité – revêtements

Résumé : Cette note réalise l'état des lieux des recherches et études menées dans le cadre du projet EV2 - durée de fonctionnement des centrales concernant l'amélioration de l'étanchéité de la paroi interne des REP, notamment vis-à-vis d'un changement de type Accident Grave

Les résultats actuels (juin 2009) permettent de comparer les différentes parades d'amélioration à l'aide de critères. Un tableau final donne une vue d'ensemble de l'étude et permet de mettre en évidence les solutions préférentielles.

Rédacteur		Vérificateur		Approbateur			
Nom-Date	Visa	Nom-Date	Visa	Chef d'entité		Chef de rang supérieur	
Nom-Date	Visa	Nom-Date	Visa	Nom-Date	Visa	Nom-Date	Visa
N. CONSTANS D. CREMIEUX 10/06/2009		E. GALLITRE 18/06/2009		P. LAZZARINI 06/07/2009			

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		

Archivage long : OUI	Archivé au FDU : OUI	Copyright EDF 2008
Livrable principal : NON		
<input type="checkbox"/> 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.	
<input type="checkbox"/> 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).	
<input checked="" type="checkbox"/> Accès E.D.F	: Ne peut être transmis à l'extérieur d'EDF que par un chef de service.	
<input type="checkbox"/> Accès libre	: Document public.	

SEPTEN

Amélioration de l'étanchéité des enceintes à double paroi – Etude comparative multicritère des parades

SYNTHÈSE

Dans le cadre du projet EV2 (préparation de l'avenir des enceintes de confinement), cette étude permet de faire la synthèse des parades actuellement (juin 2009) envisagées pour l'amélioration de l'étanchéité de la paroi interne des centrales à EDP, notamment vis-à-vis d'un chargement de type Accident Grave.

D'une part, l'étude réalisée dans le document [2] apporte une réponse plutôt mitigée quant à la faisabilité de la précontrainte additionnelle en regard de l'objectif pré-cité.

D'autre part, les propositions de diverses entreprises et fournisseurs de revêtements (organique, métallique) et l'analyse de l'étude d'autres solutions (veille) permettent de disposer des parades améliorant directement l'étanchéité du béton.

Le but final de cette note est la création d'un tableau comparatif de différentes solutions en cours d'étude (ou de pré-étude) à ce jour. La comparaison s'effectue par un système de code couleurs à partir de différents critères (coût, mise en œuvre, efficacité...) et permet de mettre en avant certaines solutions ou une combinaison de solutions les plus intéressantes.

Les études seront alors plus particulièrement dirigées vers ces parades et, si leurs bonnes caractéristiques sont confirmées, leur mise en œuvre en VD3 (TTS 2015 à Paluel 2) permettra de garantir le respect des référentiels.

Amélioration de l'étanchéité des enceintes à double paroi – Etude comparative multicritère des parades**SOMMAIRE**

1. Références	6
1.1 Documents	6
1.2 Abréviations	7
1.3 Définitions	7
2. Introduction.....	8
2.1 Contexte.....	8
2.2 Objectif de la note.....	8
2.3 Plan de la note.....	9
3. Etat des lieux	10
3.1 Structure actuelle.....	10
3.1.1 Descriptif de la précontrainte actuelle (exemple du P4)	10
3.1.2 Travaux d'étanchéité réalisés sur Flamanville.....	10
3.2 Points faibles.....	11
3.2.1 Les limites des revêtements	11
3.2.2 Les pertes de précontrainte	12
4. Renforcement structurel : la précontrainte additionnelle.....	13
4.1 Etudes réalisées.....	13
4.2 Optimisation	13
4.3 Modélisation de la structure	16
4.4 Analyse de la faisabilité de la solution.....	18
5. Amélioration de l'étanchéité.....	19
5.1 Revêtements actuels	19
5.1.1 Objectifs.....	19
5.1.2 Les revêtements.....	19
5.1.3 Suites à donner	20
5.2 Revêtement composite : FOREVA RELASTIC 300.....	20
5.2.1 Description	20
5.2.2 Etat actuel des études	21
5.2.3 Suites à donner	22
5.3 Revêtement alternatif : Le Belzona®.....	23
5.3.1 Description	23

Amélioration de l'étanchéité des enceintes à double paroi – Etude comparative multicritère des parades

5.3.2 Etat actuel des études	23
5.3.3 Suites à donner	25
5.4 Revêtement métallique « mixte »	25
5.4.1 Description	25
5.4.2 Etat actuel des études	28
5.4.3 Suites à donner	28
5.5 Revêtement métallique gaufrée GazTransport & Technigaz.....	29
5.5.1 Description	29
5.5.2 Etat actuel des études	29
5.5.3 Suites à donner	30
5.6 Autres pistes	30
5.6.1 Amélioration de l'étanchéité à proximité du plancher de service	30
5.6.2 Mise en œuvre de produits d'imprégnation	31
5.6.3 Humidification de la paroi et produit d'imprégnation.....	33
5.6.4 Biominéralisation	33
5.6.5 Précontrainte additionnelle et revêtement	35
5.6.6 Revêtement extradoss.....	36
6. Etude comparative	37
6.1 Parades étudiées	37
6.2 Critères de comparaison	37
6.2.1 Faisabilité.....	38
6.2.2 Efficacité	38
6.2.3 Sûreté	38
6.2.4 Risques	38
6.2.5 Coûts	39
6.3 Tableau de synthèse.....	39
6.4 Notation des parades	39
6.5 Synthèse.....	40
7. CONCLUSION	41
7.1 Conclusion	41
7.2 Suites à donner	42
Annexe 1 Revêtement composite NUVIA TS FOREVA RELASTIC 300 modifié (document [5]).....	43
Annexe 2 Revêtements composites Belzona®	46
Annexe 3 Tableau de synthèse des études et notation	50

Amélioration de l'étanchéité des enceintes à double paroi – Etude comparative multicritère des parades**TABLE DES ILLUSTRATIONS**

Figure 4-1 : Modélisation d'une section de la structure étudiée	14
Figure 4-2 : Courbe d'évolution des contraintes verticales dans le béton	15
Figure 4-3 : Courbe d'évolution de la contrainte résiduelle horizontale dans le béton	16
Figure 4-4 : Modélisation des déplacements sous la précontrainte horizontale	17
Figure 5-1 : Apparence du RELASTIC modifié après malaxage et application	21
Figure 5-2 : Evolution du revêtement à l'ouverture d'une fissure (0.5, 1, 2.5, 5, 6, 7, 8 et 9mm)	21
Figure 5-3 : Exemples d'utilisation du Belzona 3211®	24
Figure 5-4 : Exemples d'utilisation du Belzona 1591®	25
Figure 5-5 : Profil en croix en EPDM	26
Figure 5-6 : Schéma de la solution	26
Figure 5-7 : Proposition de fixation des tôles sur le profil	27
Figure 5-8 : Proposition d'étanchéité du TAM	27
Figure 5-9 : Schématisation de l'essai d'étanchéité des tôles et goujons	28
Figure 5-10 : Schématisation du procédé de GTT	29
Figure 5-11 : Prises de vue du système dans des enceintes de stockage du gaz	30
Figure 5-12 : Schéma de zone 8	32
Figure 5-13 : Bullage zone 11 avant et après imprégnation (2 bars)	32
Figure 5-14 : Avant / après biominéralisation	34
Figure 6-1 : Notation des parades	40

Amélioration de l'étanchéité des enceintes à double paroi – Etude comparative multicritère des parades**1. Références****1.1 Documents**

- [1] Note d'étude CIPN – Carte d'identité de l'enceinte de confinement de Flamanville – tranche 1 – Réf. EME GC 00 0096-A du 5 octobre 2000
- [2] Note d'étude SEPTEN – Evaluation de la faisabilité de la précontrainte additionnelle dans le cadre du renforcement structurel des enceintes à double paroi – Réf. ENGSGC090108 – indice A du 28 avril 2009
- [3] Note de calcul COYNE ET BELLIER – Avis d'expert sur la mise en œuvre d'une précontrainte additionnelle sur les enceintes internes – N°11854-451 – RP001 révision A du 7 août 2008
- [4] Cahier des Prescriptions Techniques (CPT) pour une étude de faisabilité industrielle d'un revêtement alternatif pour les Enceintes Internes – Réf. : ENGSGC080100 – A du 10 juin 2008
- [5] Note technique N°2 – NUVIA TS – Etude de faisabilité industrielle d'un revêtement alternatif pour les enceintes internes palier 1300-1450 – Réf : Q819EX NTF 002 B du 23 mars 2009
- [6] Mémoire portant sur l'étude de faisabilité industrielle d'un revêtement alternatif pour les parois internes des enceintes à double paroi – EIFFEL – Réf : M 876T51 NT 001 indice C du 5 mai 2009
- [7] Note technique SEPTEN – Enceintes de confinement, Synthèse des résultats d'essais de qualification des revêtements susceptibles de résister à la fissuration – Réf : ENSGC9900544 B du 13 juin 2000
- [8] Note d'étude SEPTEN – Recueil des données d'entrée pour l'estimation des fuites des Enceintes à Double Paroi en Accident Grave – Réf : ENGSGC060155 A du 29 novembre 2006
- [9] Note d'étude SEPTEN – Parades pour rendre acceptables les conséquences d'un accident grave sur les enceintes à double paroi – programme de travail – Réf : ENGSGC080020 A du 27 juin 2008
- [10] Rapport d'essai TEGG – Efficacité des produits d'imprégnation bouche pores – Essais comparatifs sur béton – Réf : EDTCE080115 B du 11 mai 2009
- [11] Communication au colloque « Art Biology ans Conservation 2002 », juin 2002 – les mortiers biologiques : une solution pour la conservation de la sculpture monumentale en pierre
- [12] Rapport sur les mesures de perméabilité sur matériau fissuré du 23 janvier 2008– Ecole centrale de Lille

Amélioration de l'étanchéité des enceintes à double paroi – Etude comparative multicritère des parades**1.2 Abréviations**

AG	Accident Grave
APRP	Accident de Perte de Réfrigérant Primaire
ASN	Autorité de Sûreté Nucléaire
BR	Bâtiment Réacteur
COB	Bureau d'études COyne et Bellier
DAC	Décret d'Autorisation de Création (des centrales nucléaires)
EDP	Enceinte à Double Paroi
EE	Epreuve Enceinte
EEE	Espace Entre Enceintes
EPDM	Ethylène Propylène Diène Monomère
PE	Paroi Externe
PI	Paroi Interne
REP	Réacteur à Eau Pressurisée
TAM	Tampon d'Accès Matériel
TTS	Tranche Tête de Série
VD3	Visite Décennale 3 (30 ans d'exploitation)

1.3 Définitions

Ancrage : ensemble de pièces permettant la mise en tension des câbles de précontrainte placé en bout de câble. L'ancrage peut être actif ou passif selon que la mise en tension s'effectue par cet ancrage ou non.

Clavette : élément de l'ancrage permettant le blocage du toron dans la tête d'ancrage.

Mise en tension toron par toron : mise en tension des torons les uns après les autres via un vérin mono-toron.

Amélioration de l'étanchéité des enceintes à double paroi – Etude comparative multicritère des parades

2. Introduction

2.1 Contexte

A partir des visites décennales à 30 ans d'exploitation (VD3) des paliers de 1300 MWe, l'accident grave va être intégré au référentiel de sûreté. Les exigences en termes de fuites vont être renforcées afin de couvrir les conditions (température, pression, irradiation) liées à l'AG et ce dès 2015 pour Paluel 2.

Le confinement des centrales de 1300 et 1450 MWe est assuré par une enceinte à double paroi. Les Décrets d'Autorisation de Création (DAC) fixent la limite admissible du taux de fuite de la paroi interne à 1.5% par jour de la masse de gaz contenue dans l'enceinte interne pour les accidents de dimensionnement.

Au minimum tous les 10 ans, l'étanchéité est vérifiée par un essai en air. Afin d'améliorer l'étanchéité des parois internes, certaines zones particulièrement sensibles ont été injectées et des revêtements composites ont été appliqués.

Aujourd'hui, ces revêtements permettent de prévenir les éventuels problèmes d'étanchéité dans les zones susceptibles de fissurer (zones tendues) et celles dites sensibles aux fuites (abords du TAM, reprises de bétonnage...) en situation d'essai ou d'accident.

Afin de vérifier la bonne tenue dans le temps de ces revêtements, des contrôles in situ sont régulièrement réalisés. D'autre part, rien ne garantit leur efficacité en cas d'accident grave.

Dans le cadre du projet EV2, divers documents ont été produits suite aux études sur des revêtements alternatifs composite, organique ou métallique, sur la précontrainte additionnelle (propositions de solutions, évaluation probabiliste des pertes de précontrainte, des déformations,...) et sur d'autres solutions (amélioration du suivi du vieillissement, des moyens de calculs, de la filtration de l'air,...).

Cette note a principalement pour but de proposer une grille de comparaison afin de dégager une solution préférentielle à mettre en œuvre dans le but de renforcer l'étanchéité de la paroi interne des EDP en tenant compte d'un ensemble de paramètres et de critères.

2.2 Objectif de la note

Flamanville 1 et 2 seront parmi les premières enceintes classées sensibles (taux de fuite risquant de dépasser 1.125%/jour) à atteindre leur VD3 en 2017 (2 ans après la TTS VD3 : 2015 pour Paluel 2). L'objectif du présent document est la présentation des différentes parades permettant de rendre acceptables les conséquences d'un AG sur les EDP, la synthèse de la comparaison des différentes solutions actuellement étudiées et donc la mise en avant d'une solution (voire plusieurs).

Amélioration de l'étanchéité des enceintes à double paroi – Etude comparative multicritère des parades

Des études complémentaires pourront alors être menées dans l'objectif d'obtenir avant les VD3 une solution efficace dans le traitement des fuites des enceintes internes des EDP. La tranche de Flamanville 2 sera plus particulièrement abordée dans cette note. En effet, nous disposons pour cette enceinte des données (déformations, taux de fuite) suffisamment exploitables.

2.3 Plan de la note

Dans un premier temps, un état des lieux général de la structure sera détaillé (§ 3). Une seconde partie (§ 4) résume les résultats actuels (juin 2009) de l'étude de faisabilité de l'amélioration structurelle de la paroi interne par la précontrainte additionnelle (document [2]). Le chapitre 5 explicite les solutions en termes d'amélioration de l'étanchéité par la mise en place de revêtements sur la paroi. Enfin, une étude comparative de l'ensemble des solutions (renforcement structurel et amélioration de l'étanchéité) étudiées jusqu'à présent et susceptibles d'être réalisées permet de conclure sur un choix préférentiel de l'une ou l'autre des parades.

Amélioration de l'étanchéité des enceintes à double paroi – Etude comparative multicritère des parades

3. Etat des lieux

3.1 Structure actuelle

3.1.1 Descriptif de la précontrainte actuelle (exemple du P4)

La précontrainte actuelle des paliers P4 est divisée en 4 parties : le radier, les armatures horizontales et verticales sur le fût et le dôme.

Les câbles sont de type 37T15 injectés au coulis de ciment.

La répartition est :

- radier : 60 câbles en deux nappes à 90° espacés d'un mètre en partie centrale,
- fût :
 - 134 câbles horizontaux 37T15 de 139 mm² tendus simultanément aux deux extrémités, espacés de 0.4 m de tension initiale à l'ancrage $0.82 \cdot F_{rg}$ et de tension moyenne 907.8 MPa,
 - 51 câbles verticaux 37T15 tendus depuis l'ancrage inférieur, arrêtés à 43 m, de tension initiale à l'ancrage $0.82 \cdot F_{rg}$ et de tension moyenne 1184.8 MPa,
- dôme : 120 câbles gamma 37T15 en trois nappes à 120° (3 familles de nappes triangulaires de 40 câbles Γ) tendus simultanément aux deux extrémités, de même caractéristiques que les câbles verticaux,
- tampon matériel : 10 câbles 12T15 tendus d'un seul côté de même tension que les câbles verticaux

Des caractéristiques supplémentaires figurent dans le document [1].

3.1.2 Travaux d'étanchéité réalisés sur Flamanville

Des injections de résine ou de silicate ont été réalisées au niveau des fourreaux et des reprises de bétonnage à l'issue des premières EE avant la précontrainte et en 1998 (pour Flamanville 2).

La zone sensible du TAM a subi quant à elle des travaux dans le but d'améliorer son étanchéité et de prévenir les problèmes d'exploitation. Ainsi, le système de fermeture du TAM est amélioré avec le changement des joints, la mise en place de cales pour compenser le phénomène d'ovalisation et l'injection de résine à l'interface virole/béton.

En parallèle, des revêtements composites en résine époxydique armée ont été qualifiés en conditions accidentelles de dimensionnement (APRP). Ils ont été appliqués au niveau des zones les moins étanches déterminées lors des EE et des zones susceptibles d'être tendues, donc fuyardes à long terme, décelées par les calculs de structures.

Amélioration de l'étanchéité des enceintes à double paroi – Etude comparative multicritère des parades

Trois systèmes de revêtement ont été mis en œuvre dans les enceintes de confinement à double paroi (P4 notamment) :

- Système MAX PERLES AL8/TAP MAEVA 1
- Système MAX PERLES AL8/TAP MAEVA 2 (avec couche d'accrochage – 2120 m² sur Flamanville 1)
- Système CHRYSOR NOVADUR 1060TR (non appliqué sur Flamanville, mais sur d'autres parois internes)

Le premier revêtement a été appliqué entre 1998 et 1999, puis remplacé par le second. Le troisième revêtement a été appliqué entre 2000 et 2002 mais ne peut plus l'être en raison de la classification CMR catégorie 3 de l'un de ses constituants (risques pour la santé des travailleurs).

Au total ce sont quasiment 2800 m² et 2000 m² qui ont été revêtus jusqu'à présent sur Flamanville 1 et 2.

Actuellement, des campagnes d'essai sont en cours afin de trouver un nouveau revêtement compatible aux diverses exigences de tenue structurelle, d'étanchéité ou encore toxicologiques (chapitre 5).

3.2 Points faibles

3.2.1 Les limites des revêtements

Les revêtements composites utilisés sur les enceintes internes sont qualifiés à l'APRP. Leur efficacité a été démontrée par les EE : leurs caractéristiques sont suffisantes pour répondre aux exigences du DAC en termes de fuites. Cependant, à partir de la VD3, les enceintes devront respecter certains critères en AG. Or, en AG, les conditions d'environnement sont plus défavorables et les revêtements actuels risquent de ne plus tenir sous de telles conditions d'ambiance.

De plus, certains revêtements utilisés ne peuvent plus l'être aujourd'hui à cause du risque toxicologique qu'ils pourraient faire courir aux applicateurs.

Les revêtements actuellement présents sur l'intrados de l'enceinte interne ont permis de réduire franchement les taux de fuite sur Flamanville 1 mais à une proportion plus faible que prévu.

Plus critique, sur Flamanville 2, le taux de fuite a même augmenté entre la VD1 et la VD2 et ce malgré les travaux de revêtement réalisés.

Il est donc nécessaire, si l'on souhaite poursuivre le traitement des fuites par des revêtements, de rechercher de nouveaux matériaux. Ils devront offrir d'une part toutes les caractéristiques structurelles et d'étanchéité pour être qualifiés à l'ensemble des scénarii (AG compris) et d'autre part satisfaire aux exigences en termes de protection des travailleurs.

Amélioration de l'étanchéité des enceintes à double paroi – Etude comparative multicritère des parades**3.2.2 Les pertes de précontrainte**

L'enceinte interne P4 est une structure en béton précontraint dans laquelle le fût est précontraint horizontalement et verticalement et le dôme dans 3 directions à 60°.

La technique de la précontrainte conçue par Eugène Freyssinet vient directement des limites du béton armé. Le béton est naturellement fissuré (retrait, sollicitations,...). Afin de limiter l'ouverture des fissures, les armatures actives reprennent les efforts de traction de la structure. Mais lorsque les sollicitations sont trop importantes, les fissures du béton s'ouvrent. L'étanchéité de la paroi peut alors être engagée.

La technologie du béton précontraint repose sur la mise en traction des câbles. Après le bétonnage, ils sont tendus par des vérins, ce qui entraîne leur raccourcissement. Le béton est alors comprimé par les câbles de précontrainte, les fissures ne peuvent alors s'ouvrir que sous d'importantes sollicitations dépassant les critères de dimensionnement.

Cependant, les dispositions constructives de la précontrainte entraînent des pertes instantanées de la tension des câbles. Elles sont dues d'une part à la mise en tension des câbles (mise en tension successive des câbles) et d'autre part au système utilisé (recul d'ancrage par la clavette et frottements du câble sur sa gaine). De plus, les propriétés intrinsèques des matériaux béton et acier comme le retrait, le fluage ou encore la relaxation sont des phénomènes provoquant à long terme une diminution de la tension des câbles et donc de la compression du béton.

L'ensemble de ces phénomènes provoquent les pertes de précontrainte instantanées et différées.

Avec le temps, les câbles compriment donc moins le béton. En cas d'épreuve enceinte ou d'accident, le béton risque alors d'entrer en traction localement. Les fissures présentes (venant notamment du retrait du béton) peuvent s'ouvrir et la fuite à travers la paroi interne de l'enceinte risque d'augmenter.

Ainsi, le procédé même de la mise en précontrainte de l'enceinte interne a une influence sur les fuites à travers la paroi.

Il semble donc nécessaire d'étudier des parades qui agiraient directement sur ces pertes pour limiter les fuites des parois internes et garantir le respect du critère du DAC en épreuve et en accident.

Amélioration de l'étanchéité des enceintes à double paroi – Etude comparative multicritère des parades

4. Renforcement structurel : la précontrainte additionnelle

4.1 Etudes réalisées

Depuis 2002, EDF/SEPTEN a sollicité plusieurs bureaux d'études afin d'obtenir des propositions de solution de renforcement de la structure par la mise en œuvre d'une précontrainte additionnelle extérieure, le cas d'étude retenu étant le palier P4.

Ainsi, les études réalisées par Freyssinet et Ingérop ont abouti au dimensionnement de cette précontrainte additionnelle (document [2]) avec quelques variantes. COB a donné un avis d'expert en retour à ces propositions et démontre notamment un manque de précision dans les hypothèses de dimensionnement et qualifie les résultats en termes de contraintes et de déformations de la structure « d'inquiétants » (document [3]).

Les détails des différentes solutions ainsi que les remarques des résultats de la solution d'Ingérop au niveau du TAM figurent dans la note sur la mise en œuvre d'une précontrainte additionnelle (document [2]).

4.2 Optimisation

Le travail détaillé dans la note de faisabilité de la précontrainte additionnelle (document [2]) repose sur la compréhension des travaux précédemment effectués, la reprise des hypothèses de dimensionnement et aboutit à de nouveaux résultats.

Dans un premier temps, des hypothèses plus précises ont été considérées comme la valeur de la tension des câbles initiaux ou le pourcentage de précontrainte à ajouter. Les résultats obtenus permettent de réduire le nombre de câbles ainsi que leur nombre de torons.

Dans un second temps, les pertes de précontrainte dans les câbles additionnels ont été évaluées à partir des eurocodes. Ceci permet de dimensionner la précontrainte additionnelle nécessaire à partir des contraintes résiduelles présentes dans les câbles de précontrainte additionnelle à 60 ans d'exploitation. Ainsi, des courbes d'évolution de la compression du béton (Figure 4-2, Figure 4-3 et document [2]) dans toute la structure ont été tracées et comparées à la compression minimale nécessaire du béton afin d'assurer au minimum 1.0 MPa de compression en épreuve enceinte (mise en pression du BR de 0.38 MPa) et ce jusqu'à la fin de l'exploitation de la centrale.

Les résultats de cette étude montrent que seul un ajout de précontrainte horizontale dans le fût est nécessaire pour atteindre cet objectif. La compression verticale étant suffisante même sur une durée de vie de l'enceinte de 60 ans et le dôme n'étant que faiblement fissuré.

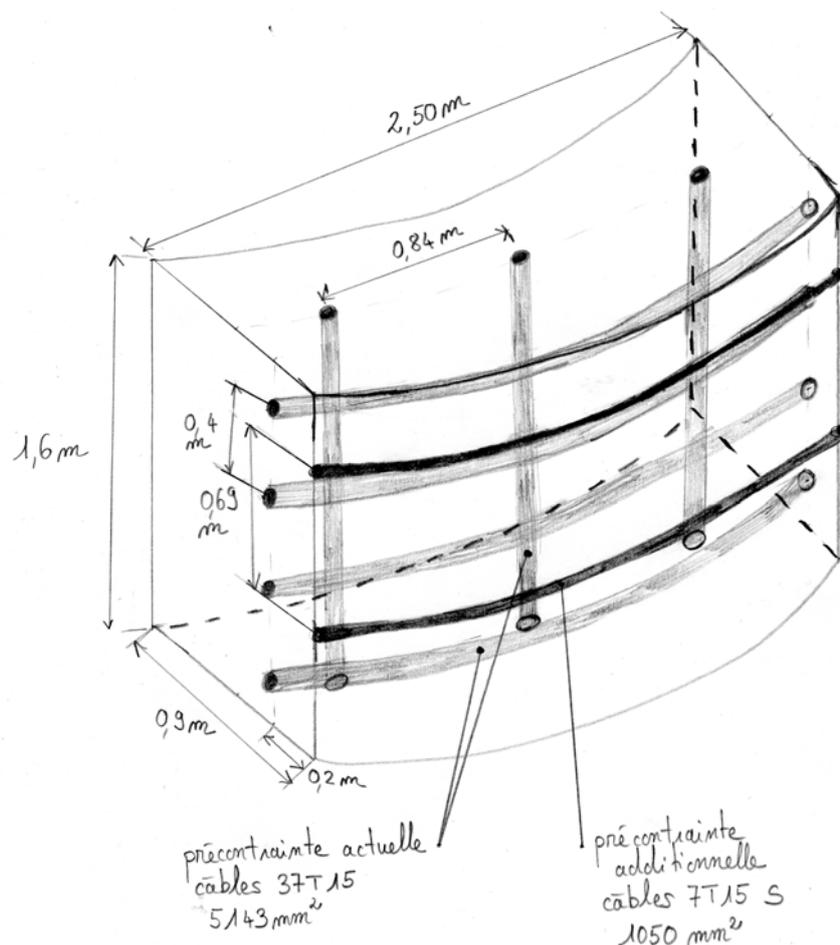
Amélioration de l'étanchéité des enceintes à double paroi – Etude comparative multicritère des parades

Figure 4-1 : Modélisation d'une section de la structure étudiée

Ces résultats théoriques sont confirmés par les observations in situ de déformation et de fissuration du béton sur les différentes zones de la structure. En effet, lors des précédentes épreuves enceintes, les principales fissures responsables des fuites ont été observées sur le fût et sont verticales.

L'étude de l'influence de la mise en place de cerces horizontales uniquement sur la structure a mis en évidence plusieurs constatations :

- les câbles initiaux horizontaux subiront une charge supplémentaire et donc une légère perte de leur précontrainte
- les câbles verticaux seront légèrement retendus (par effet de Poisson)
- un très faible allongement vertical de l'enceinte se produira (mais il ne sera pas pris en compte dans le calcul des contraintes)
- la compression du béton dans le fût sera globalement augmentée (Figure 4-2 et Figure 4-3)

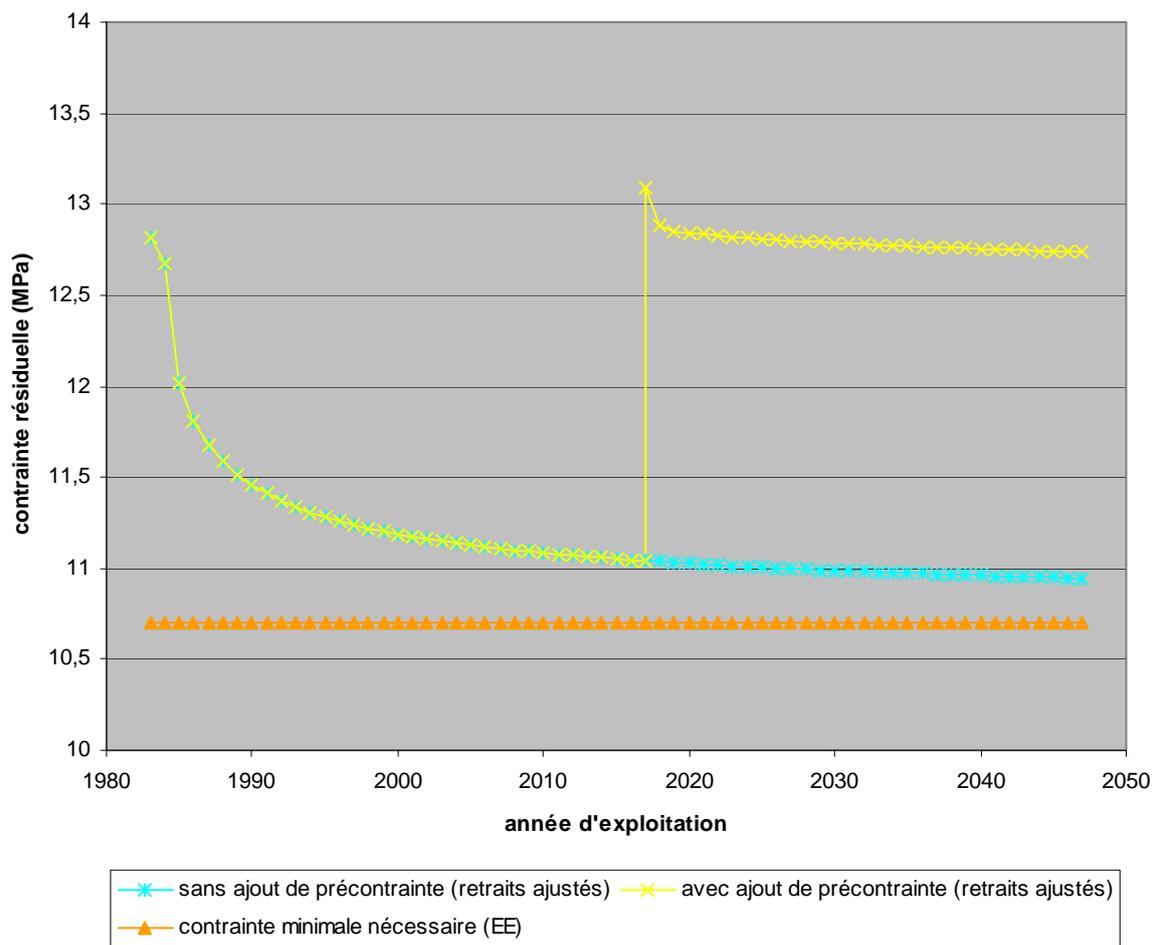
Amélioration de l'étanchéité des enceintes à double paroi – Etude comparative multicritère des parades

Figure 4-2 : Courbe d'évolution des contraintes horizontales résiduelles dans le béton

Les courbes ont été tracées à partir de valeurs de retrait du béton estimées expérimentalement sur l'enceinte de Flamanville 2.

La Figure 4-2 montre la faible marge à 60 ans entre la compression résiduelle horizontale sans l'ajout d'une précontrainte et la compression minimale souhaitée. Un ajout de compression horizontale dans le fût est donc nécessaire. A noter que les courbes ont été réalisées à partir d'hypothèses idéales (zone courante du fût sans déviation des câbles, pertes de précontrainte annexes et autres influences défavorables à la structure).

Les zones singulières comme les abords du TAM ou la sous-ceinture torique à la jonction fût-dôme peuvent être plus fissurées que d'autres et le béton risque d'entrer en traction localement en épreuve ou en accident.

Cependant, il est difficile de traiter ces zones avec de la précontrainte additionnelle d'une part à cause des difficultés d'accès et de mise en œuvre et d'autre part cela risque d'ajouter des contraintes défavorables (éventuellement traction) à la structure liées aux déviations. Ces zones devront certainement être traitées par une autre solution (revêtement ou autre).

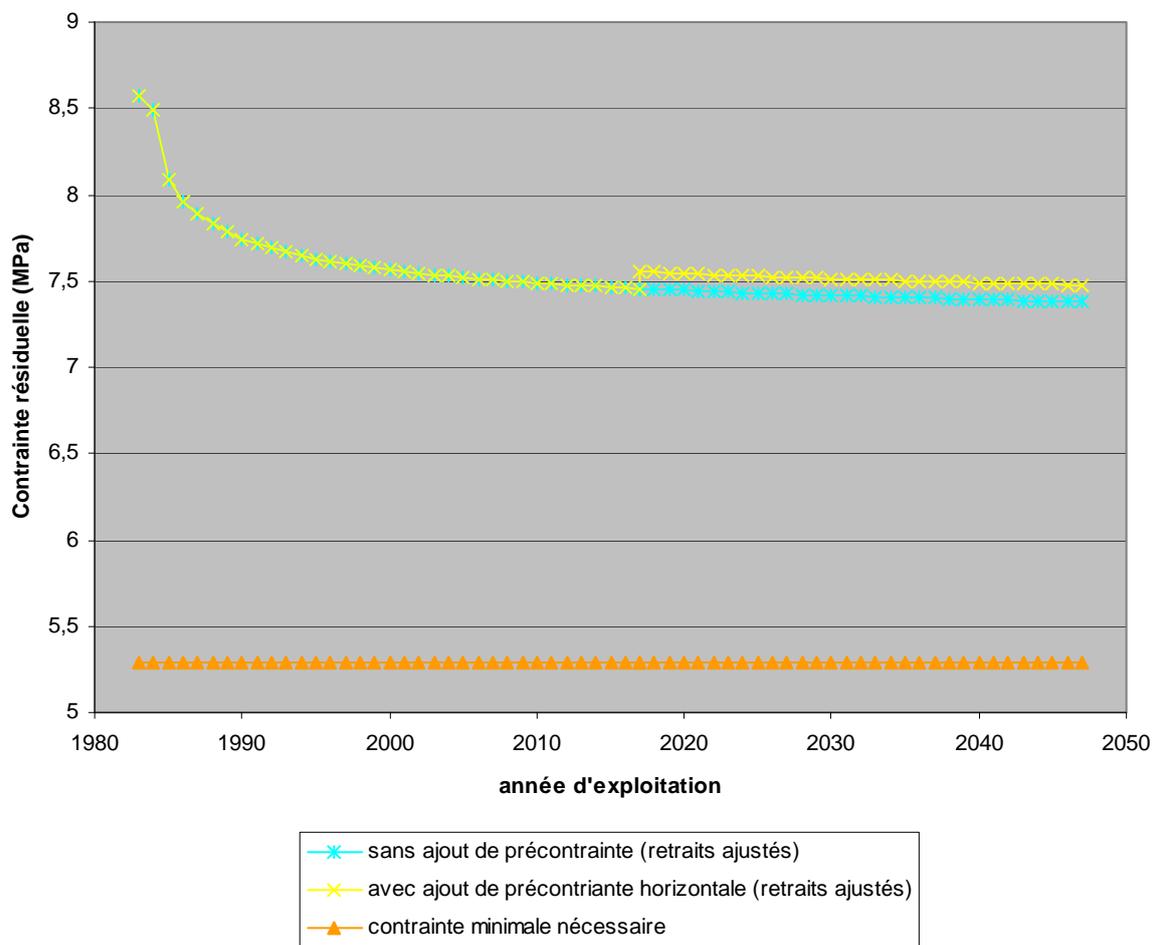
Amélioration de l'étanchéité des enceintes à double paroi – Etude comparative multicritère des parades

Figure 4-3 : Courbe d'évolution de la contrainte résiduelle verticale dans le béton

Un ajout de précontrainte horizontale seule provoquera un ajout de compression horizontale dans le béton et donc permettra de limiter l'ouverture des fissures verticales en épreuve et en accident.

L'optimisation pourrait être encore améliorée en considérant la possibilité de retendre les câbles de précontrainte additionnelle tous les 10 ans. Ceci permettrait de diminuer le nombre de câbles et/ou la force avec laquelle ils sont tendus et donc les effets négatifs sur la structure.

4.3 Modélisation de la structure

Il s'agit à présent de vérifier l'efficacité de cette solution, en étudiant l'influence de la mise en tension de nouvelles cerces sur les déformations et donc les contraintes appliquées à la structure.

Pour cela, nous disposons d'une modélisation réalisée en interne au SEPTEN de l'enceinte interne de type P4 sur le logiciel EFFEL version GRAITEC 14.1. La

Amélioration de l'étanchéité des enceintes à double paroi – Etude comparative multicritère des parades

géométrie du modèle est suffisamment détaillée pour obtenir des résultats cohérents au niveau de la zone courante du fût. Le radier, le gousset, le fût et le dôme ont été représentés avec leurs variations d'épaisseur, de même que les nervures. Cependant dans cette étude simplifiée, ni les sas, le TAM, les traversées ou encore la ceinture torique n'ont été représentés.

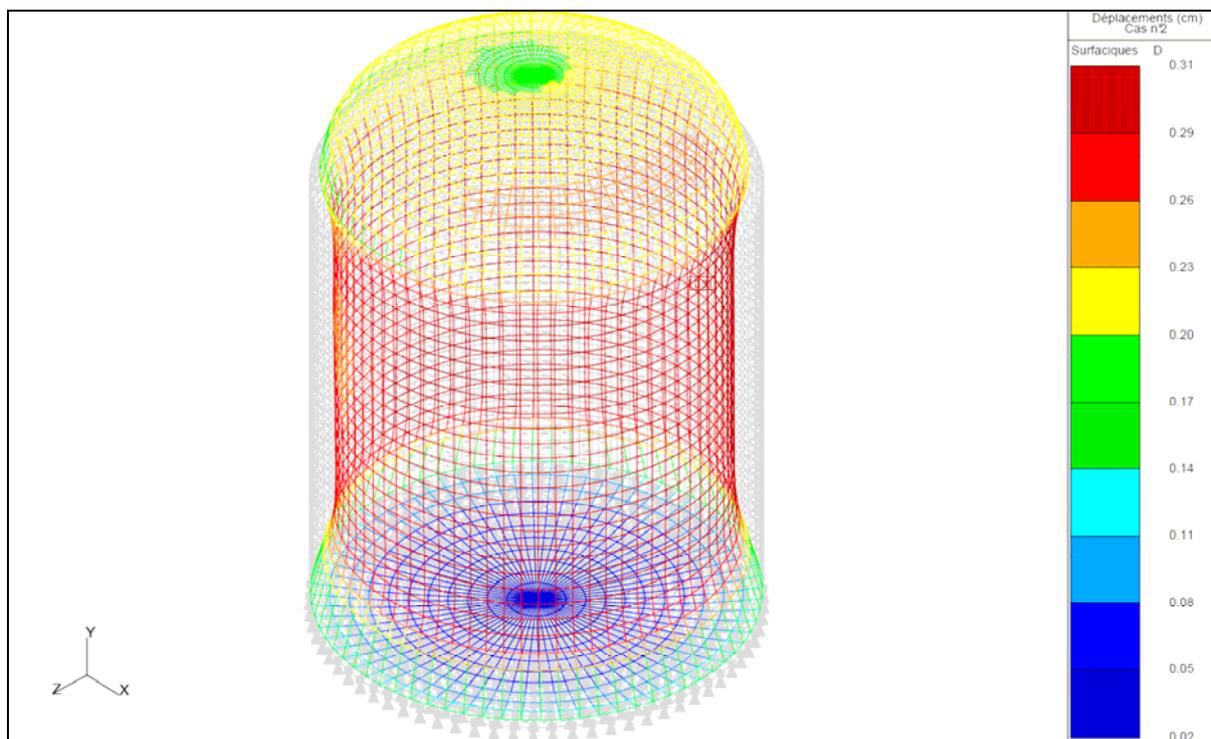


Figure 4-4 : Modélisation des déplacements sous la précontrainte horizontale

Les résultats sont comparables à ceux obtenus dans l'étude Ingérop référencée dans le document [2].

Les déformations sont de l'ordre de 10^{-4} tangentiellement en section courante du fût et verticalement au sommet du dôme. Les contraintes ajoutées par la précontrainte additionnelle horizontale compriment le béton de manière globale, des zones singulières peuvent entrer en légère traction.

Ainsi, les zones sensibles de la structure comme la ceinture du dôme, le gousset, le dôme et les nervures sont susceptibles de subir des efforts de traction. Cependant, ces contraintes semblent suffisamment faibles pour être acceptées par le béton et les câbles initiaux.

Même si des études complémentaires sont à prévoir, cette modélisation permet d'avoir une idée du comportement de la structure à des telles sollicitations.

Amélioration de l'étanchéité des enceintes à double paroi – Etude comparative multicritère des parades**4.4 Analyse de la faisabilité de la solution**

Les résultats obtenus dans la note sur la précontrainte additionnelle (document [2]) permettent d'établir une conclusion provisoire sur la faisabilité de cette solution.

L'étude du document [2] a montré que seule la précontrainte horizontale doit être renforcée. Il a donc été choisi de mettre en place des cerces de type 7T15 S espacés d'environ 70 cm sur toute la hauteur du fût.

Les résultats sont obtenus à partir d'hypothèses simplificatrices (structure parfaite en section courante, absence de zones singulières, contraintes appliquées régulièrement sur tout le fût,...).

En section courante, les contraintes et les déformations induites sont acceptables. Mais la précontrainte additionnelle peut faire apparaître des effets néfastes, notamment de la traction dans le béton aux abords du TAM ou dans le dôme.

Ainsi, bien qu'elle semble efficace en section courante, la précontrainte additionnelle risque de ne pas limiter l'ouverture des fissures en épreuve dans certaines zones particulières. Or c'est précisément dans ces zones que l'ajout de compression est le plus nécessaire.

Un autre point à considérer dans la faisabilité de cette solution est la mise en œuvre. Elle ne pourra se faire principalement qu'en arrêt de tranche de type VD. Ainsi, il sera nécessaire d'une part que la préparation (études détaillées, contrats, dossiers d'intervention,...) soit finalisée avant 2015 et d'autre part que la mise en œuvre de la précontrainte se fasse sans difficulté majeure. De plus, la précontrainte additionnelle touche directement la structure du BR, il est donc nécessaire de prévenir tout risque d'endommagement sur les enceintes lors du chantier.

Cette étude met en évidence le caractère sensible de cette solution et son éventuelle incapacité à traiter seule les fissures. L'ajout d'un revêtement ou autre en parallèle paraît indispensable. Ces parades semblent quant à elles pouvoir répondre aux exigences d'étanchéité sans ajout d'une précontrainte, l'intérêt de celle-ci devient donc discutable.

Le renforcement structurel pourrait être utile sur certaines tranches (Flamanville 1-2 et Civaux 1) pour lesquelles les fissures verticales du fût sont particulièrement fuyardes en épreuve.

Une alternative à étudier est de mettre en œuvre des cerces horizontales faiblement tendues. Les câbles de ce cerclage seraient alors uniquement sollicités lors de la mise en pression du BR. Cette solution aurait pour avantage de limiter les contraintes négatives appliquées à la structure par la présence des cerces horizontales mais aurait certainement l'inconvénient de nécessiter des sections d'acier plus importantes.

Une étude interne est en cours de développement au sein de l'entreprise NUVIA TS filiale de Freyssinet. Une présentation à EDF est envisagée fin 2009.

Amélioration de l'étanchéité des enceintes à double paroi – Etude comparative multicritère des parades

5. Amélioration de l'étanchéité

5.1 Revêtements actuels

5.1.1 Objectifs

Des revêtements ont été appliqués sur des zones susceptibles d'être fissurées sous l'effet de la pression.

Les zones à revêtir sont déterminées en tenant compte à la fois du retour d'expérience des épreuves et des résultats de calcul indiquant les zones sensibles lors des différentes situations d'essai ou d'accident en fin de vie des ouvrages.

Cependant, les revêtements utilisés sont qualifiés pour le cas de l'APRP et leur tenue reste incertaine sur plusieurs décennies. Ainsi, les activités de recherche se poursuivent sur de nouveaux revêtements et un budget est prévu afin de remplacer ces revêtements entre la VD3 et la VD4 des 1300 MWe.

D'ici 2015, les premières centrales 1300 MWe auront atteint 30 ans d'exploitation, le référentiel de sûreté lié à l'accident grave sera alors considéré. Rien ne permet aujourd'hui de qualifier ces mêmes revêtements à l'AG. D'une part la recherche est orientée vers de nouveaux revêtements alternatifs dont la tenue serait meilleure en AG et d'autre part des essais se poursuivent afin d'apprécier la tenue des revêtements existants en AG.

5.1.2 Les revêtements

Les revêtements mis en œuvre proviennent de deux sociétés : MAX PERLES et RESIPOLY CHRYSOR.

Les premiers revêtements de MAX PERLES étaient des systèmes à base de résine comprenant une couche mécaniquement fusible (enduit EDO). Cette couche comprenait à l'origine un treillis de fibres de verre, utilisé sur Cattenom 2 et supprimé par la suite. Ensuite, dans le but d'améliorer l'adhérence et la tenue à la température, le système (sans EDO) a été amélioré par une modification de la résine et le renforcement du tissu.

Le document [7] valide la qualification des revêtements MAX PERLES en résine époxydique armée de fibres de verre sans enduit EDO et avec enduit EDO comportant ou non un treillis. La couche d'enduit de rattrapage de planéité n'a pas d'influence sur la tenue du revêtement.

Ainsi, les systèmes qualifiés MAX PERLES sont :

- une préparation de surface
- primaire EDO/30S
- enduit de rattrapage de planéité
- résine AL8T/AP MAEVA, tissus
- saupoudrage de silice F51
- finition AL8T/AP MAEVA

Amélioration de l'étanchéité des enceintes à double paroi – Etude comparative multicritère des parades

Le système qualifié sur le béton de RESIPOLY est :

- Préparation de surface
- Enduit de rattrapage de planéité NOVAFILL 2R
- Couche primaire NOVADUR 1060 TR
- Couche résine NOVADUR 1060 TR
- Tissu DIAGONAP
- Résine NOVADUR 1060 TR
- Couche résine NOVADUR 1060 TR
- Tissu DIAGONAP
- Résine NOVADUR 1060 TR
- Finition NOVADUR 1060 TR

Les détails des résultats d'essai sont mentionnés dans le document [7].

5.1.3 Suites à donner

Les solutions techniques permettant de remédier à l'augmentation de perméabilité des enceintes reposent à l'heure actuelle essentiellement sur la mise en place de revêtements d'étanchéité à l'intérieur du BR. Or, sur les enceintes sensibles, le taux de surface intérieure revêtue est très élevé. Cette solution ne peut donc plus suffire à faire face à l'évolution des taux de fuite à long terme.

Il y a donc un risque de dépassement du critère d'étanchéité du DAC d'ici les VD3 des 1300 MW (voire VD2 pour les N4) sans que l'on dispose de solution permettant de repasser sous ce critère.

L'utilisation de ces revêtements par ajout de couches successives ne semble donc plus pouvoir améliorer suffisamment l'étanchéité des enceintes. Des recherches sont donc menées afin de trouver d'autres solutions permettant d'assurer une étanchéité correcte des enceintes jusqu'à 60 ans et lors d'un AG.

5.2 Revêtement composite : FOREVA RELASTIC 300

5.2.1 Description

Dans le cadre de la recherche d'un revêtement alternatif, NUVIA TS a été sollicité afin de proposer un revêtement d'étanchéité correspondant aux exigences du document [5]. Le FOREVA RELASTIC 300 est la solution préconisée par NUVIA dans le traitement de la paroi interne des enceintes de confinement.

Ce produit est un revêtement souple de surface à base de liant hydraulique et de résine. Il est constitué de deux phases (liquide et poudre) à mélanger.

Après les premiers essais réalisés en 1998, et suite à un avis défavorable du SCAST, la formule de celui-ci a été légèrement modifiée, d'où son appellation « Foreva Relastic 300 modifié ».

Amélioration de l'étanchéité des enceintes à double paroi – Etude comparative multicritère des parades

Relastic modifié appliqué en une couche



Figure 5-1 : Apparence du RELASTIC modifié après malaxage et application

Son application se fait en deux couches minimum de même composition (contrairement aux revêtements actuels).

Ce revêtement composite se distingue de ceux actuellement présents par sa faible épaisseur et son nombre de couche. Les détails des caractéristiques de ce produit sont explicités en Annexe 1 et document [5].

5.2.2 Etat actuel des études

La Figure 5-2 montre l'état du revêtement soumis à une traction provoquée par l'ouverture d'une fissure entre 0.5 mm et 9 mm.

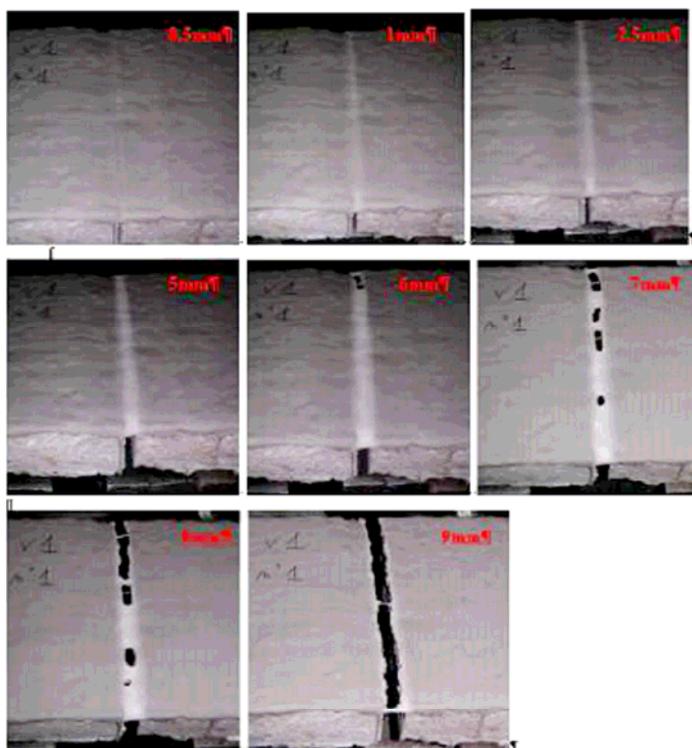


Figure 5-2 : Evolution du revêtement à l'ouverture d'une fissure (0.5, 1, 2.5, 5, 6, 7, 8 et 9mm)

Amélioration de l'étanchéité des enceintes à double paroi – Etude comparative multicritère des parades

Le revêtement remplit bien les conditions de tenue et de résistance à la traction du CPT (tenue à l'ouverture d'une fissure de 5 mm). Ce matériau étant très souple, il sera indispensable d'apprécier les risques de pénétrabilité de ce revêtement dans les fissures sans l'effet de la pression et surtout les risques de déchirure que cela peut engendrer.

Des essais de perméabilité à l'air sur des éprouvettes ont été réalisés à TEGG/CEMTE. Six échantillons de 2.3 et 4.8 mm d'épaisseur ont été testés. Les résultats montrent une perméabilité inférieure à 0.05 l/h/m² pour 5 d'entre elles (Annexe 1). La dernière éprouvette ayant probablement subi un endommagement avant l'essai. Ainsi, le matériau seul semble capable de répondre à l'exigence du CPT (<0.15 l/h/m²). Ces essais ont été réalisés sur des épaisseurs supérieures à celles normalement appliquées sur le béton, les résultats ont été adaptés pour une épaisseur du revêtement 1.6 mm. Ils montrent une perméabilité du revêtement proche du critère (0.05 l/h/m²) et que l'augmentation de l'épaisseur des couches appliquées ne joue pas en faveur d'une diminution de la perméabilité de la paroi.

L'analyse de ce revêtement a mis en évidence un certain nombre de points bloquants pour sa qualification :

- Le revêtement n'a pas obtenu d'avis toxicologique favorable de la part d'EDF. En effet, la partie poudreuse contient de trop petites particules de silice. Une modification dans la composition du matériau a permis d'en réduire de manière significative l'émission. Mais il n'est toujours pas officiellement accepté par le pôle toxicologique. NUVIA doit fournir de nouveaux documents qui permettront éventuellement de valider son utilisation du point de vue de la santé des travailleurs.
- D'autre part, la résistance au feu du produit n'est pas connue, les résultats des essais sont attendus pour fin juin 2009.

Le deuxième livrable de cette étude est référencé [5].

5.2.3 Suites à donner

La qualification du revêtement FOREVA RELASTIC 300 dépend de l'avis du pôle toxicologique d'EDF.

Les résultats d'essai de perméabilité du revêtement seul semblent concluants, reste à présent à réaliser des tests du revêtement sur une paroi en béton fissurée et sous l'effet de la pression (risque de pénétration et de déchirure).

Si les résultats en attente sont concluants, des essais complémentaires, de tenue aux irradiations notamment, devront être réalisés. En cas de validation de l'ensemble des critères exigés dans le CPT, le revêtement subira des essais in situ sur un mur d'essai et puis sur une enceinte.

Amélioration de l'étanchéité des enceintes à double paroi – Etude comparative multicritère des parades**5.3 Revêtement alternatif : Le Belzona®****5.3.1 Description**

Le premier contact avec le gérant d'ALLIATECH (distributeur français du Belzona®) est positif. Les produits semblent correspondre aux exigences de tenue à la température et l'entreprise travaille régulièrement dans le domaine nucléaire. Les points bloquants déjà annoncés par ALLIATECH sont la disponibilité du produit à grande échelle et son coût.

Il propose donc une application de son produit sur des zones relativement limitées, particulièrement sollicitées.

En retour du CPT, l'entreprise ALLIATECH propose une série de produits Belzona® :

- des revêtements de la famille des époxyds conçus pour protéger les surfaces métalliques plus particulièrement qui pourraient répondre à une protection locale contre les hautes températures,
- un système d'étanchéité du béton (émulsion + bande de renfort en fibre de verre) présentant des caractéristiques pouvant correspondre à nos exigences.

Les fiches techniques de ces produits sont jointes en Annexe 2.

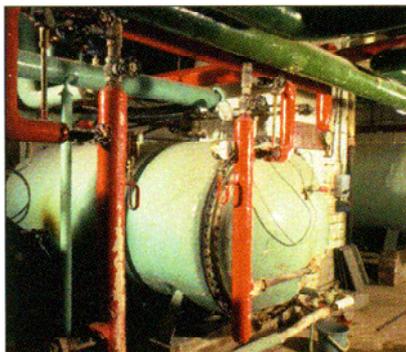
5.3.2 Etat actuel des études

Le produit 3211 semble le plus apte à améliorer l'étanchéité de la paroi interne des centrales. La résistance au feu est bonne, la longévité du produit est suffisante, la tenue structurelle à la déformation semble correcte et la mise en œuvre adaptée. Cependant, la perméabilité à la vapeur d'eau et à l'air, la résistance à l'irradiation et à la température ou encore l'adhérence sur le support sont des données encore méconnues. Des précisions sont donc demandées sur le produit Belzona® 3211.

Dans l'attente de ces éléments, nous pouvons constater que ce produit a déjà été utilisé sur des conduites de vapeur, des tuyauteries et des chaudières dans le cadre d'une protection d'isolants thermiques (Figure 5-3). Ces revêtements sont actuellement utilisés dans un système : source de chaleur – isolant – revêtement. Dans notre cas, le système serait : source de chaleur – revêtement – béton.

Amélioration de l'étanchéité des enceintes à double paroi – Etude comparative multicritère des parades

ROBINETTERIE



CHAUDIÈRES

Figure 5-3 : Exemples d'utilisation du Belzona 3211®

L'étude des revêtements de type époxy montre que ces produits (Belzona® 5811 – 5891 – 1321 – 1391 – 1591) possèdent de bonnes propriétés :

- résistance à des températures élevées de l'ordre de 150°C
- résistance à un environnement agressif (résistance chimique)
- résistance mécanique

Cependant, rien n'est spécifié sur leur capacité à garantir une bonne étanchéité du béton.

Ces produits nous ont été plus particulièrement proposés puisqu'ils sont faciles d'application (le 3211 notamment) et à priori les plus aptes à répondre à nos exigences pour un coût surfacique raisonnable. Si ceux-ci ne sont pas satisfaisants d'autres produits pourront être envisagés.

En première étude, le Belzona 1591® semblerait assez adapté aux conditions d'ambiance du BR en AG (Figure 5-4). L'Annexe 2 présente la fiche technique de ce revêtement. Il bénéficie d'une bonne résistance à la chaleur (280°C), d'une faible absorption d'humidité, d'une bonne adhérence sur de nombreux supports à hautes températures et d'une résistance à la décompression (delta de pression de 30 bars) à 130°C. Des renseignements complémentaires pourraient permettre d'évaluer la faisabilité de ce revêtement à répondre aux exigences du CPT.

Amélioration de l'étanchéité des enceintes à double paroi – Etude comparative multicritère des parades

EVAPORATEURS

COLONNES D'ABSORPTION
DESSALEURS

Figure 5-4 : Exemples d'utilisation du Belzona 1591®

5.3.3 Suites à donner

Des renseignements complémentaires ont été demandé pour le Belzona 3211® et 1591®.

Si la perméabilité, la tenue mécanique, la résistance à la température, aux irradiations, à la pression,... correspondent aux exigences du CPT des essais sur éprouvettes puis in situ pourront être prévus.

Une vérification de ces produits par le pôle toxicologique d'EDF devra être menée en préalable à ces essais.

Il sera alors possible de faire appliquer les revêtements sur des éprouvettes et les essais seront alors effectués par TEGG.

5.4 Revêtement métallique « mixte »**5.4.1 Description**

Dans le cadre d'un contrat d'étude de faisabilité industrielle d'un revêtement alternatif métallique, EIFFEL a réalisé une étude complète.

Ainsi, partant du simple revêtement métallique (liner) appliqué sur les enceintes à simple paroi (900 MW) et sur l'EPR comme coffrage perdu et en considérant les exigences techniques de mise en œuvre, l'entreprise a abouti à une solution « mixte » composée d'une tôle inoxydable en appui sur un profil en EPDM en forme de croix.

En effet, les exigences en termes de déformation nécessiteraient la mise en place d'un matériau flexible entre les plaques métalliques. Le profil en EPDM permettrait donc la dilatation des plaques provoquée notamment par des effets thermiques sans les détériorer. Ainsi, le profil en EPDM permettrait d'assurer la limitation des contraintes appliquées sur celles-ci.

Le profil en forme de croix en EPDM serait donc posé sur la paroi béton (Figure 5-5). Ce matériau est reconnu pour sa bonne tenue au vieillissement, à sa tenue aux radiations et à la vapeur d'eau. En complément, un mastic pourra éventuellement être appliqué sous le profil pour rattraper les défauts géométriques et assurer la jonction des pièces.

Amélioration de l'étanchéité des enceintes à double paroi – Etude comparative multicritère des parades

L'assemblage des profils entre eux se ferait par un système de queues d'aronde sans soudure. Pour limiter les risques de ligne de fuite, la zone de raccordement pourra être renforcée par un collage ou l'application d'un mastic.

Présentation du profil (dimensions 600 * 600 mm) :

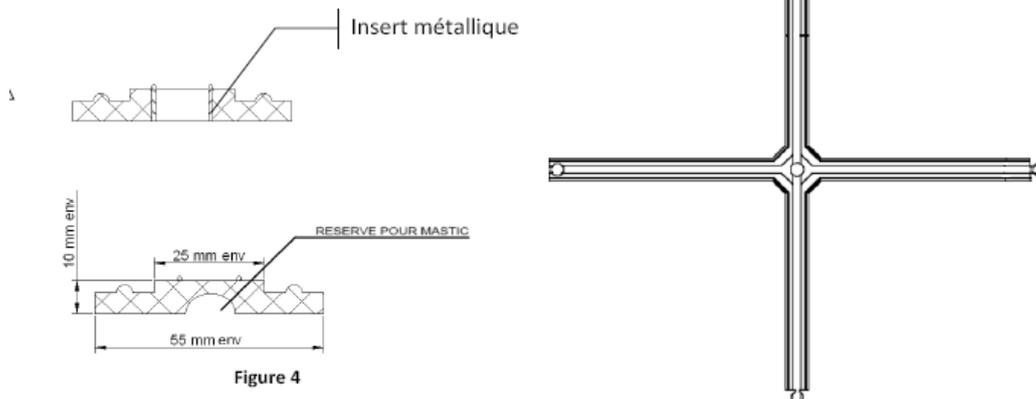


Figure 5-5 : Profil en croix en EPDM

Les tôles en acier inoxydable reposent sur les boursouflures du profil afin de créer une zone d'étanchéité. Le serrage des goujons, situés aux quatre coins de la tôle, doit permettre un écrasement suffisant et homogène sur les boursouflures en EPDM. Pour épouser parfaitement la paroi de l'enceinte, le bras horizontal du profil sera moulé au rayon du bâtiment et la tôle sera cintrée (Figure 5-6).

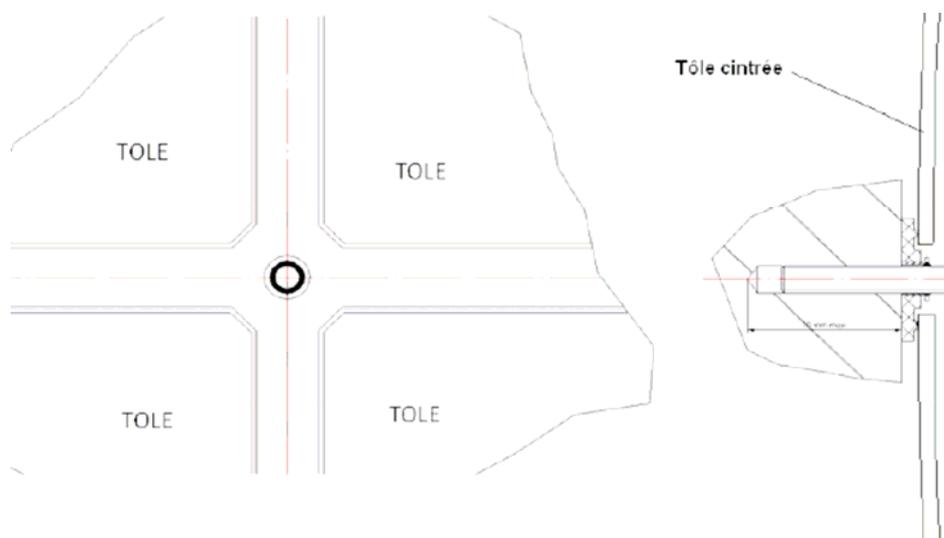


Figure 5-6 : Schéma de la solution

L'étanchéité des points de fixation sera assurée par des rondelles étanches (Figure 5-7). De plus, le moulage d'un insert métallique dans l'épaisseur du profil est réalisable pour éviter toute détérioration du profil au passage du goujon (Figure 5-5). Pour réduire au maximum l'exposition du profil aux rayonnements, un plat métallique peut être ajouté afin d'obtenir un recouvrement total du profil (Figure 5-7).

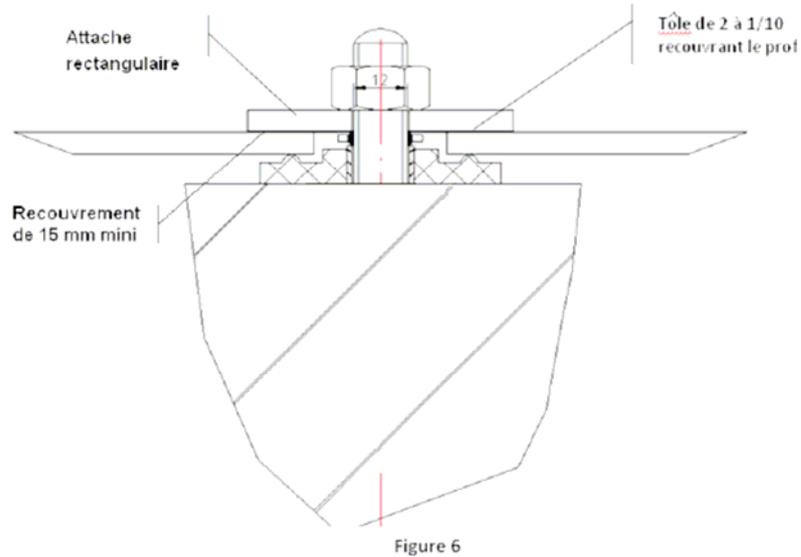
Amélioration de l'étanchéité des enceintes à double paroi – Etude comparative multicritère des paradesFixation des tôles :

Figure 5-7 : Proposition de fixation des tôles sur le profil

Les zones singulières (notamment le TAM et les traversées) demandent une étude d'étanchéité particulière. Leur forme circulaire peut rendre difficile la mise en œuvre de tôles carrées.

La solution proposée par EIFFEL est la mise en place d'un demi-profil autour de la traversée sur laquelle les profils en croix seraient soudés (Figure 5-8). Les tôles pourraient être usinées à la pièce et fixées par des trous dans l'épaisseur du profil.

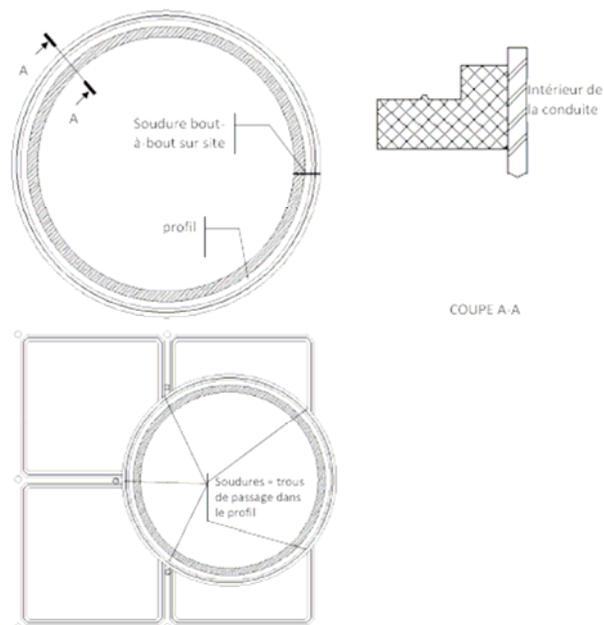


Figure 5-8 : Proposition d'étanchéité du TAM

Amélioration de l'étanchéité des enceintes à double paroi – Etude comparative multicritère des parades**5.4.2 Etat actuel des études**

Actuellement, l'étude a été validée par EDF, des éléments complémentaires sont à apporter afin de résoudre les quelques points bloquants notamment concernant les opérations de maintenance.

En effet, cette solution étant réversible, il doit être possible de vérifier les taux de fuite présents au niveau de chaque goujon et de chaque plaque (ou groupe de plaque). Les zones les plus fuyardes pourront alors être réparées (resserrage des goujons) ou remplacées (changement de plaques, de goujons, du profil EPDM,...). Actuellement la solution envisagée est l'utilisation d'une plaque test installée sur les goujons existants. La mise en pression de l'espace entre la plaque test et les tôles permettrait de connaître le débit de fuite localement à l'aide d'un manomètre (Figure 5-9).

La principale difficulté de cette solution est la tenue de la plaque test et des goujons à la pression lors des essais.

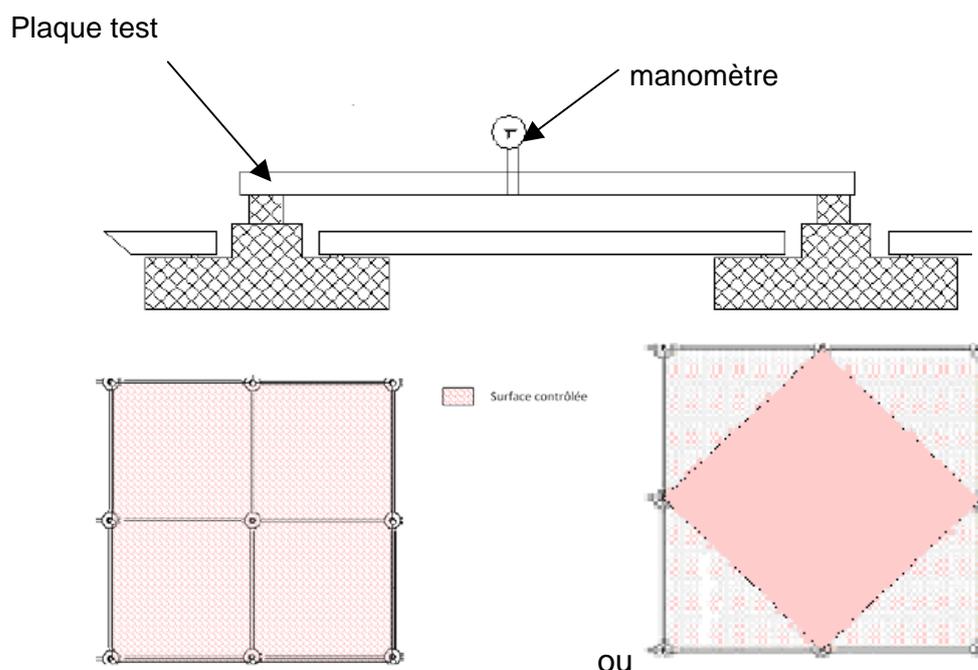


Figure 5-9 : Schématisation de l'essai d'étanchéité des tôles et goujons

Le livrable 2 de cette étude est référencé [6].

5.4.3 Suites à donner

Si l'ensemble des critères présents dans le CPT sont validés, l'étude pourra alors se poursuivre, par des essais in situ sur un mur d'expérimentation puis éventuellement sur une enceinte. Le matériau EPDM est utilisé actuellement en centrale sur des joints du TAM et semble tenir à un scénario de type APRP mais ses propriétés (temps de tenue) doivent être vérifiées en AG.

Amélioration de l'étanchéité des enceintes à double paroi – Etude comparative multicritère des parades

Un point délicat à étudier est l'évacuation de l'air éventuellement présent entre le béton et la tôle suite à la sous pression de l'EEE.

5.5 Revêtement métallique gauffrée GazTransport & Technigaz**5.5.1 Description**

L'entreprise GazTransport & Technigaz (GTT) est spécialisée dans l'étude et la mise en œuvre de revêtements d'étanchéité dans les méthaniers et les cuves de stockage de gaz naturel liquéfié (GNL).

Le ralentissement de cette activité a poussé GTT à transposer ses connaissances vers d'autres applications. C'est ainsi que GTT propose son savoir faire dans le but d'apporter une solution à la problématique des enceintes de confinement d'EDF.

Leur technologie repose sur la mise en place d'un système « isolant thermique + feuillet métallique » sur les enceintes de stockage en béton (Figure 5-10).

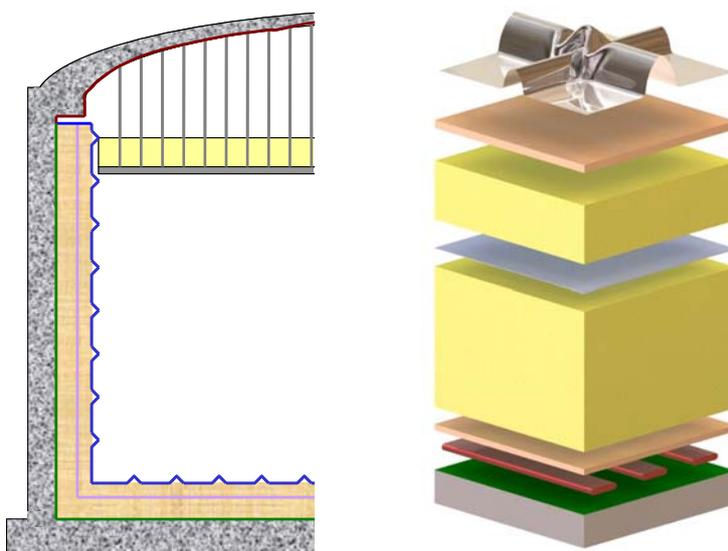


Figure 5-10 : Schématisation du procédé de GTT

5.5.2 Etat actuel des études

L'entreprise a présenté dans quels cadres leur procédé est utilisé. Il semble correspondre aux exigences des enceintes de confinement, seul la faisabilité du traitement des singularités n'est pas acquise. De plus, aucun élément de coût n'est disponible. Ce système est intéressant puisque la structure même des feuillets métalliques fait que ce revêtement serait susceptible de se déformer sous la contrainte sans s'endommager.

Amélioration de l'étanchéité des enceintes à double paroi – Etude comparative multicritère des parades**5.5.3 Suites à donner**

Seul le feuillet métallique serait appliqué sur les enceintes, l'isolant thermique n'étant pas utile. Il s'agit donc de savoir comment la solution peut être adaptée aux centrales et surtout de quelle manière sera effectuée la fixation de ces feuillets.

De plus, les enceintes de stockage du gaz sont régulières (Figure 5-11), la mise en œuvre de cette solution aux abords des traversées et des zones singulières de la paroi est donc à concevoir. Enfin, le coût devra être estimé.

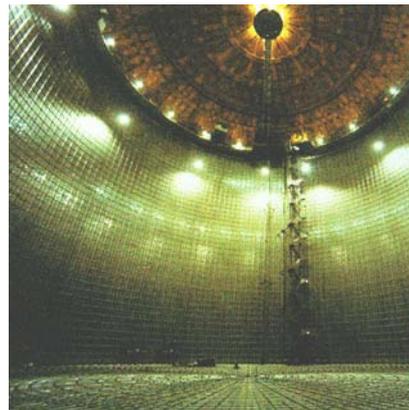


Figure 5-11 : Prises de vue du système dans des enceintes de stockage du gaz

5.6 Autres pistes**5.6.1 Amélioration de l'étanchéité à proximité du plancher de service**

Des calculs ont permis d'évaluer les doses d'irradiation intégrées par les revêtements actuellement présents sur les enceintes en AG. Ces estimations ont été réalisées à différentes distances (en hauteur) par rapport au plancher de service.

Par analogie aux doses d'irradiation et aux températures subies dans les conditions accidentelles de dimensionnement, une certaine efficacité des revêtements a pu être estimée.

Le document [8] explicite les résultats et montre que certains revêtements restent efficaces jusqu'à 75% à partir d'un mètre au-dessus du plancher de service pour une durée de 48h en AG.

Des essais sont prévus en 2010 pour affiner ces estimations. Mais une étude déjà envisageable serait la protection contre les rayonnements β des revêtements à proximité du plancher de service, par exemple à l'aide d'un écran métallique d'un mètre de hauteur fixé sur le plancher face aux revêtements.

Une autre solution serait la mise en œuvre d'un matériau résistant aux irradiations observées à cet endroit (voir notamment Belzona®, paragraphe 5.3).

Amélioration de l'étanchéité des enceintes à double paroi – Etude comparative multicritère des parades**5.6.2 Mise en œuvre de produits d'imprégnation**

Le BIP en produit aqueux a été appliqué sur les parois externes de Civaux afin de diminuer leur perméabilité. Ce produit a la faculté de pénétrer dans le béton sur quelques millimètres et d'obstruer les pores du béton pour le rendre moins perméable.

Les produits d'imprégnation peuvent être une solution dans le traitement de l'étanchéité pour plusieurs raisons.

D'une part, ils diminuent la perméabilité des parois en béton aux liquides et aux gaz en limitant les transferts et donc les fuites directes. En effet, ils permettent de renforcer la structure cristalline en surface par la formation d'un réseau complémentaire dans le béton durci. L'amélioration éventuelle de l'étanchéité passerait donc par la diminution de la porosité du béton en obstruant les pores et les capillaires.

D'autre part, ils limitent les échanges des fluides du béton vers l'extérieur et donc les phénomènes de séchage. Lorsque l'humidité du béton diminue, d'une part celui-ci se tasse (fluage de dessiccation), augmentant les pertes de précontrainte et d'autre part il devient plus perméable aux gaz. Ainsi limiter le séchage pourrait permettre de réduire les fuites diffuses liées à la perméabilité du béton ou, dans certains cas, à des reprises de bétonnage. En revanche leur capacité à réduire les fissures est très faible.

Leur utilisation sur la paroi interne est à étudier compte tenu des bonnes propriétés de ces produits et de la facilité de leur application (par rapport aux revêtements composites). Ils pourraient apporter une réponse intéressante à la limitation des fuites en complément d'une parade efficace en cas d'ouverture des fissures, les produits d'imprégnation devenant inefficaces dans ce cas.

Des essais ont été effectués à TEGG dans le but de comparer l'efficacité de 6 produits d'imprégnation de type polymère et minéralisateur dans la réduction de la perméabilité à l'air, la prévention contre le risque de corrosion des armatures et l'amélioration de l'étanchéité à l'eau (document [10]).

Les essais se poursuivent pour les trois ayant donné les meilleures performances d'étanchéité à l'air.

Ainsi, les produits d'imprégnation BIP de Max Perlès, NOVAPRIM A de Resipoly Chrysor et PURIGOSOL de Sika ont été appliqués sur le mur d'expérimentation BULMUR de Chatou. Ce mur est constitué d'un béton poreux, de reprises et de défauts de bétonnage.

Les perméabilités de chacun sont mesurées à la boîte collectrice de fuite et à l'appareillage TORRENT.

L'exemple de la zone 8 (Figure 5-12) donne des résultats satisfaisants en améliorant en moyenne la perméabilité d'un coefficient entre 3 et 8.

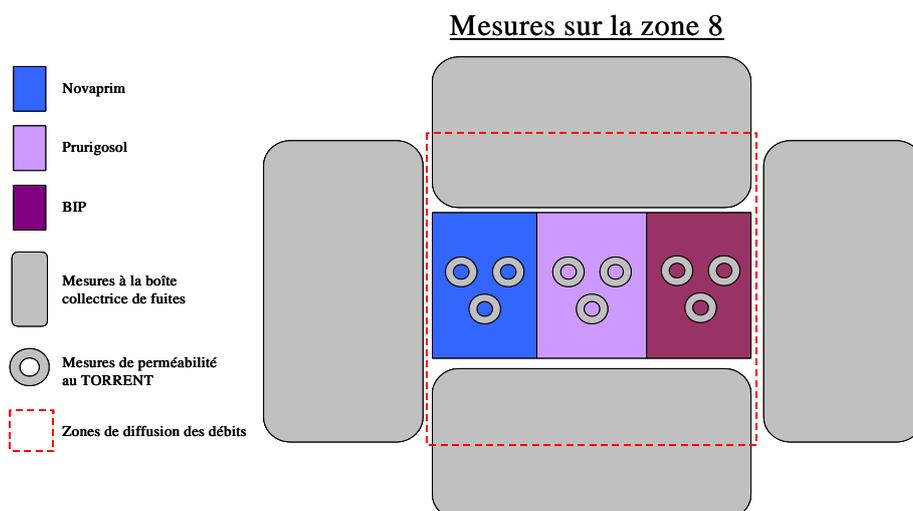
Amélioration de l'étanchéité des enceintes à double paroi – Etude comparative multicritère des parades

Figure 5-12 : Schéma de zone 8

L'essai à l'eau savonneuse sur la zone 11 montre une diminution des débits (avant et après imprégnation) au niveau de la zone traitée et une augmentation dans les zones périphériques (boîtes collectrices de fuite) (Figure 5-13)

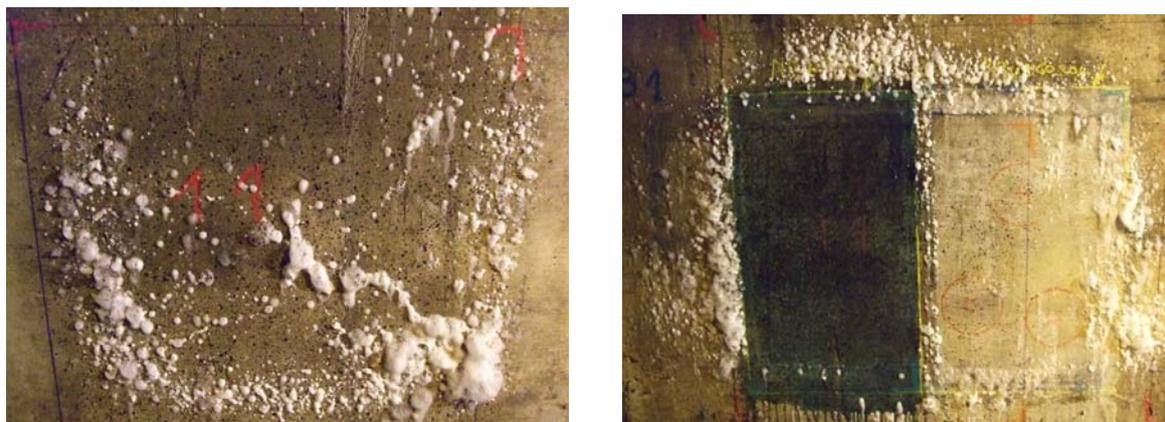


Figure 5-13 : Bullage zone 11 avant et après imprégnation (2 bars)

Des zones d'imprégnation ont été délimitées, les résultats montrent une diminution de la perméabilité pour l'ensemble des zones traitées et ce quelque soit le produit utilisé. Le flux de l'air est reporté vers les secteurs adjacents. L'air contourne donc les zones imprégnées en favorisant la zone au-dessus de celle traitée, celle du dessous bénéficiant probablement de produits ayant coulé par gravité. Le problème du contournement se pose principalement pour cette parade destinée à être appliquée sur l'extrados. En effet, l'extrados devra être imprégné sur une surface la plus étendue possible afin de limiter les effets de report.

Actuellement les produits d'imprégnation ont été validés par le pôle toxicologique mais le retour d'expérience des applicateurs met en avant la nécessité d'une meilleure ventilation de l'EEE lors de l'application.

Amélioration de l'étanchéité des enceintes à double paroi – Etude comparative multicritère des parades

Globalement, les produits d'imprégnation semblent répondre à l'amélioration de l'étanchéité des enceintes sans présenter de point particulièrement bloquant.

Les études et les essais se poursuivent par l'application des trois produits cités précédemment sur l'extrados de la paroi interne de Belleville 2 d'une surface totale de 250 m² en amont de son épreuve enceinte VD2 (juillet 2009). Ceci permettra d'effectuer un essai sur un site industriel et de confirmer les bons résultats obtenus sur le mur d'expérimentation.

A court terme, selon les résultats sur Belleville 2 l'application d'un de ces produits sur la majeure partie de Belleville 1 pourra être lancée.

5.6.3 Humidification de la paroi et produit d'imprégnation

Cette autre solution repose sur l'étude de la perméabilité du béton à l'air en fonction de son taux d'humidité. En effet, lorsque le béton est saturé en eau, il est très peu perméable à l'air. Or, dès le bétonnage et tout au long de la vie du béton, l'eau présente a tendance à s'évacuer, le béton voit donc son taux d'humidité diminuer.

L'idée est donc de diminuer la perméabilité du béton à l'air en agissant sur le taux d'humidité du béton.

Une étude est en cours avec l'école centrale de Lille (document [12]) et des essais sont envisagés sur le mur d'expérimentation de Chatou.

La mise en œuvre de cette parade consisterait en l'aspersion d'eau sur la paroi pendant une longue durée (à définir mais en jour à priori). Un point critique serait l'application de cette solution à l'enceinte interne. En effet, l'eau aspergée devra être récupérée en fond d'EEE et traitée avant sa réutilisation ou son évacuation.

L'humidification de la paroi pourrait être validée dans le cadre de l'épreuve enceinte dont les critères considèrent uniquement la perméabilité à l'air. Mais cette parade devra, pour être validée en accident, apporter un effet bénéfique en termes de perméabilité à la vapeur d'eau, celle-ci augmentant avec le taux d'humidité.

Les bénéfices apportés par l'humidification de la paroi diminueraient à la fin de chantier. Pour limiter le séchage, ils pourraient être combinés avec ceux de la mise en œuvre de produits d'imprégnation. D'une part, le béton serait saturé en eau et sa perméabilité à l'air réduite et d'autre part, le produit d'imprégnation permettrait de limiter les échanges entre le béton et l'extérieur. Le béton serait alors maintenu humide et les gaz provenant du BR franchiraient la paroi interne en plus faible quantité.

5.6.4 Biominéralisation

Des essais en laboratoire et sur des roches tendres de moments historiques menés par le Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques (document [11]) ont

Amélioration de l'étanchéité des enceintes à double paroi – Etude comparative multicritère des parades

permis de déterminer la faculté de bactéries à produire du calcaire dans un milieu favorable (température, pression, milieu de vie, alimentation).

En effet, les bactéries installées dans de micro niches à la surface d'une pierre se multiplient et s'accrochent les unes aux autres. Une observation microscopique fait apparaître un voile de carbonate de calcium à la surface de la pierre en une semaine. Dans les semaines suivantes, le carbonate sèche et durci.

Les essais in situ sur une roche tendre de type Tuffeau ont montré les capacités de cette solution à combler les fissures et les défauts macroscopiques.

Pour savoir si cette solution alternative peut être appliquée dans le cas du traitement de la paroi du BR il est nécessaire de connaître un certain nombre de paramètres :

- la possibilité d'utiliser des grains de roches proches des constituants du béton existant,
- les conditions de tenue du calcaire produit par les bactéries (température, pression, irradiation),
- la présence éventuelle de poussières ou d'autres dépôts importants générés par les bactéries,
- l'efficacité globale du traitement en termes de comblement des fissures, d'amélioration de l'étanchéité et de tenue aux contraintes (déformations notamment) appliquées selon les épisodes de fonctionnement de la centrale (normal, épreuve, APRP, AG),
- les contraintes de mise en œuvre.

Les résultats en termes de comblement des défauts et d'amélioration de la porosité semblent plutôt bons (Figure 5-14), il serait alors intéressant d'étudier ces facultés plus en détail en ce qui concerne le béton de la paroi interne.



Figure 5-14 : Avant / après biominéralisation

Cependant, de nombreux éléments mettent d'ores et déjà en avant les limites de la faisabilité de cette solution au niveau des enceintes.

Tout d'abord la méconnaissance de nombreux paramètres (voir ci-dessus). En effet, les résultats obtenus sur les bâtiments historiques ne donnent pas les capacités de

Amélioration de l'étanchéité des enceintes à double paroi – Etude comparative multicritère des parades

résistance du mortier aux sollicitations. Si le mortier biologique est appliqué dans les fissures présentes, aucune étude ne permet de définir jusqu'à quel point de sollicitation mécanique les fissures resteront fermées et donc étanches.

Mais surtout, des tests complémentaires d'étanchéité seraient à prévoir afin d'évaluer le réel comblement des fissures, la tenue du calcaire en traction (induite par la sollicitation en pression lors des épreuves ou des accidents) et la limitation des fuites par la paroi interne.

Les essais réalisés ont mis en évidence des difficultés de mise en œuvre de ce mortier. En effet, les bactéries étant des organismes vivants, il est nécessaire de les appliquer avec précaution. Des outils spéciaux comme des seringues, des spatules ou des pinceaux devront être utilisés pour l'injection. La mise en place des bactéries doit se faire sous des conditions d'hygiène particulière comme la préparation minutieuse de la pâte ou un nettoyage des outils avec des détergents sans agent de destruction des bactéries. La carbonatogenèse est terminée environ quatre semaines après la pose des mortiers. Pendant toute cette phase la température doit être maintenue au dessus de 10°C et la paroi ne doit être en contact avec aucun agent agressif.

Au vu de la surface de paroi à traiter il peut être difficile voire impossible de respecter toutes ces conditions. De plus, les essais ont été réalisés dans le cas de défauts visibles de façon macroscopique. Or les fissures sur l'intrados de la paroi interne sont relativement fines et il peut être difficile de réaliser des injections notamment dans les fissures « respirantes » qui sont fermées en fonctionnement normal de la centrale.

L'étude ne sera donc à priori pas poursuivie. Mais cette solution est conservée en tant que veille technologique.

5.6.5 Précontrainte additionnelle et revêtement

Le paragraphe 4.4 a montré les limites de la précontrainte additionnelle dans l'amélioration du taux de fuite de la paroi interne en épreuve. D'une part, les effets des câbles additionnels horizontaux sont peu connus sur des zones singulières comme les traversées et peuvent être défavorables à la structure (mise en traction). D'autre part, certaines zones, comme la sous-ceinture torique, ne pourront être suffisamment renforcées par la mise en œuvre de câbles supplémentaires.

Ainsi, une solution serait de traiter localement les zones sensibles avec une solution de type revêtement (composite, organique, imprégnation voire métallique). La mise en œuvre de ces solutions est plus aisée, ces revêtements pourraient donc très bien diminuer le taux de fuite dans les zones difficiles d'accès en parallèle de la précontrainte additionnelle appliquée en zone courante, au moins pour les situations de dimensionnement.

Cette combinaison de solutions permet également de répondre aux limites des revêtements. En effet, comme il a été vu précédemment, leur tenue en AG n'est pas

Amélioration de l'étanchéité des enceintes à double paroi – Etude comparative multicritère des parades

encore démontrée et leur tenue au vieillissement pourrait être limitée à 20 ou 30 ans. Les travaux de maintenance lors d'arrêts de tranche seraient donc indispensables. Ainsi, limiter leur surface d'application permettrait d'éviter d'importants travaux (reprise, remplacement des revêtements sur de grandes surfaces). Alors que la précontrainte additionnelle ne nécessiterait pas d'importantes maintenances (retension des câbles éventuellement).

La combinaison de parades pourrait donc être un bon compromis, elle permettrait de multiplier les effets bénéfiques et d'annuler certains points bloquants.

5.6.6 Revêtement extradados

Des recherches sont également menées en parallèle dans l'objectif de mettre en œuvre une solution d'amélioration de l'étanchéité de la paroi interne en traitant son extradados.

En effet, par rapport à l'intradados, l'application d'un revêtement à l'extradados présente l'avantage de ne pas être exposé directement à l'ambiance chaude et dosante du BR, les parements extradados sont également un peu moins encombrés que les intradados.

Cependant, les revêtements se doivent de tenir à la sous-pression (notamment lorsque l'enceinte est sous pression), les risques de fuites par contournement des zones revêtues sont élevés et l'application de certains produits peut être interdite en cas de risque toxicologique défavorable (document [9]).

La première étape à franchir avant d'engager la qualification d'un revêtement organique en extradados est sa capacité à tenir à la sous-pression relative de 0.5 MPa pendant 24h (épreuve enceinte ou début d'AG, enveloppe de l'APRP). Cette condition a été satisfaite en 2006 pour trois revêtements. Cependant, deux d'entre eux (systèmes souples Polyréa TLD et CHRYSOR) font l'objet d'un avis toxicologique défavorable. Les essais de tenue à la contre-pression réalisés début 2008 n'ont pas permis de donner une suite favorable à ces revêtements mais les essais sur éprouvettes se poursuivent pour le troisième (système souple armé MAX PERLES).

Amélioration de l'étanchéité des enceintes à double paroi – Etude comparative multicritère des parades

6. Etude comparative

Cette note a pour principal but de confronter les différentes solutions actuellement étudiées dans le traitement de l'étanchéité de la paroi interne des enceintes à double paroi. Deux possibilités majeures se sont dégagées : le renforcement structurel et l'amélioration directe de l'étanchéité du béton.

L'objectif de cette étude est de mettre en évidence une solution préférentielle (éventuellement combinant plusieurs solutions unitaires) et de détailler les étapes à réaliser avant d'obtenir sa qualification complète. D'autres solutions peuvent être intéressantes sous réserve de compléments ou d'améliorations pour lesquels il est utile de maintenir une veille.

Dans cette partie, l'ensemble des solutions précédentes sont reprises et comparées. Pour cela, des critères ont été retenus afin de comparer les différentes solutions. La solution la mieux notée sera donc celle qui semble la plus apte à répondre aujourd'hui aux exigences.

6.1 Parades étudiées

Les chapitres précédents ont repris l'état d'avancement des recherches en juin 2009. Ainsi, la comparaison se fait sur les solutions suivantes :

- La précontrainte additionnelle horizontale extérieure (document [2])
- Le revêtement organique FOREVA RELASTIC 300 de Nuvia TS
- Le revêtement métallique « mixte » d'EIFFEL
- Le revêtement métallique de GTT
- Les revêtements organiques Belzona 1591® et 3211®
- Les produits d'imprégnation BIP (Max Perlès), NOVAPRIM A (Resipoly Chrysol) et PURIGOSOL (Sika)
- La biominéralisation
- La combinaison de parades (précontrainte + revêtement ; humidification + imprégnation)

6.2 Critères de comparaison

Les critères de comparaison doivent être choisis de façon à comparer au mieux les différentes parades détaillées dans les chapitres précédents. Pour cela, ils ont été regroupés en catégories. Il en sortira une note globale pour :

- la faisabilité de la solution,
- son efficacité à remplir les fonctions qui lui sont dévolues,
- la sensibilité que pourrait montrer l'Autorité de Sûreté face à une telle modification
- son niveau en termes de risques tout au long de sa durée de vie
- les coûts engendrés par la solution.

Amélioration de l'étanchéité des enceintes à double paroi – Etude comparative multicritère des parades**6.2.1 Faisabilité**

La faisabilité définit dans quelle mesure la solution peut être réalisable en termes de :

- Délais des études (Avant-projet sommaire d'ici fin 2009, avant-projet définitif pour fin 2010), des travaux (en exploitation et/ou en arrêt, possibilité de faire les premières réalisations en 2015), fréquence des opérations de maintenance (en accord avec la fréquence des arrêts, tous les 18 mois, environ 15 jours d'arrêt, tous les 10 ans, visite décennale)
- Avis toxicologique, qui évalue les dangers auxquels sont exposés les travailleurs lors de la mise en œuvre (et en présence) de la solution
- Contraintes de mise en œuvre en correspondance avec les contraintes sur site, nombre limité de personnes sur place, travaux supplémentaires (servitudes)
- Disponibilité du produit en termes de durée d'approvisionnement avant et pendant le chantier, possibilités de stockage, existence de plusieurs fournisseurs
- Qualification de la main d'œuvre, formation, possibilité de sous-traiter la mise en œuvre.

6.2.2 Efficacité

L'efficacité peut être appréciée en évaluant les capacités de la solution à remplir l'ensemble des fonctions pour lesquelles elle est prévue :

- Tenue structurelle globale de la solution, adhérence (pour les revêtements)
- Amélioration du taux de fuite, de l'étanchéité du béton
- Indépendance de la solution, sa capacité à répondre seule aux exigences
- Pérennité de la solution, durée de vie, types de réparations à prévoir

6.2.3 Sûreté

L'ASN contrôle l'ensemble des actions menées sur les centrales dans l'optique de s'assurer de la conformité de celles-ci en termes de sûreté. L'accord de l'ASN est nécessaire pour la plupart des modifications envisagées sur les centrales :

- le respect des critères généraux qui permettent de conclure quant à la capacité de la solution à remplir les différentes fonctions
- l'existence d'un REX sur site ou non qui permet d'avoir des éléments tangibles quant au bénéfice de sûreté apporté par la solution

6.2.4 Risques

Les solutions étudiées présentent des risques potentiels à plusieurs niveaux :

- Pérennité de la structure, actions de la solution sur la structure
- Amélioration du confinement et donc de la sûreté en cas d'accident
- Impacts environnementaux (déchets, recyclage)
- Actions sur les éléments annexes autres que la structure (traversées notamment)

Amélioration de l'étanchéité des enceintes à double paroi – Etude comparative multicritère des parades**6.2.5 Coûts**

Différents types de coûts sont à étudier pour chaque solution :

- Coût des études, des travaux, des opérations de maintenance
- Pertes de rendement (arrêts supplémentaires)

6.3 Tableau de synthèse

Le tableau suivant reprend les différentes solutions comparées et les critères d'évaluation. L'avancement des études de chacune des solutions à juin 2009 permet de remplir le tableau avec les caractéristiques connues. Cette synthèse (Annexe 3) permet de réaliser la notation des parades.

6.4 Notation des parades

La notation se réalise à l'aide d'un code à 4 couleurs : vert, jaune (hachures horizontales), orange (hachures verticales) et rouge (hachures obliques). Les hachures ont été ajoutées afin de nuancer la couleur utilisée sachant que la couleur de fond est toujours d'un niveau plus favorable que la couleur représentative de la hachure.

Le vert correspond à un critère pour lequel les données de la parade sont connues et favorables.

Le jaune symbolise des données inconnues ou incomplètes mais pour lesquelles on pressent une réponse favorable.

La couleur orange indique des données inconnues ou incomplètes et dont obtention sera particulièrement délicate voire incertaine.

Enfin une couleur rouge donne au critère, dont on connaît les éléments, un avis clairement négatif pour le choix de cette parade.

Le critère du coût des différentes solutions ne sont connus que très partiellement et uniquement pour l'une ou l'autre. Ainsi, ce critère n'a été évalué que de manière globale, le code couleur n'a été attribué qu'en réalisant une comparaison des parades, les unes par rapport aux autres. Aucune valeur précise n'est mentionnée, seul le coût global approximatif de la solution rapporté à celui des autres parades permet de noter ce critère.

Amélioration de l'étanchéité des enceintes à double paroi – Etude comparative multicritère des parades

CRITERES	FAISABILITE	EFFICACITE	SURETE	RISQUES	COUTS par tranche
PARADES	délais, mise en œuvre, toxicologie	tenue, étanchéité, indépendance	critères, REX	actions, impacts	
précontrainte additionnelle (câbles horizontaux uniquement)					
revêtement RELASTIC 1000m ²					
revêtement métallique EIFFEL					
revêtement métallique GTT					
revêtement BELZONA 3211 système renforcé					
revêtement BELZONA 1591					
produit d'imprégnation					
COMBINAISONS					
revêtement + précontrainte					
humidification de la paroi + produit d'imprégnation					

Figure 6-1 : Notation des parades

6.5 Synthèse

La synthèse repose sur les résultats obtenus de la comparaison des différentes parades aux critères précédemment sélectionnés.

Pour chaque catégorie, une ou plusieurs parades sera privilégiée. Il s'agit alors ici de combiner les critères afin d'obtenir des degrés dans la comparaison. De plus, certains critères, s'ils ne sont pas respectés, sont éliminatoires.

La synthèse englobe l'ensemble des caractéristiques auxquelles doit répondre une solution et recherche la meilleure combinaison de critères pour dégager l'une ou l'autre des parades étudiées.

Le travail suivant consistera à détailler les études et recherches complémentaires à effectuer sur cette (ces) parade(s) afin d'en garantir la mise en œuvre lors de la VD3 pour les enceintes à double paroi jugées sensibles (et éventuellement, dans une moindre mesure, sur les non sensibles également).

Les autres parades seront conservées en tant que veille et un aperçu rapide des actions à mener afin de les qualifier est explicité dans le chapitre suivant.

Amélioration de l'étanchéité des enceintes à double paroi – Etude comparative multicritère des parades

7. CONCLUSION

7.1 Conclusion

Cette note d'étude a permis de parcourir les solutions alternatives actuellement à l'étude dans le traitement de l'étanchéité de la paroi interne des EDP. Un état des lieux de la problématique a mis en évidence les limites de la structure d'une part celles des matériaux béton et acier et d'autre part celles des travaux d'étanchéité réalisés jusqu'à maintenant sur les enceintes sensibles.

Ces observations permettent de comprendre la nécessité de rechercher d'autres solutions. Ces études, menées dans le cadre du projet EV2 (préparation de l'avenir des enceintes de confinement) suivent deux directions en parallèle : le renforcement structurel et l'amélioration de l'étanchéité du béton.

Le renforcement structurel de l'enceinte interne peut être réalisé par la mise en place d'une précontrainte additionnelle. Le document [2] reprend de manière détaillée les résultats de l'étude de faisabilité de cette solution. Basée sur la fonction première des câbles de précontrainte de limiter l'ouverture des fissures du béton, son dimensionnement s'appuie sur des hypothèses propres aux matériaux utilisés et à la mise en œuvre de la solution.

Cette étude préliminaire aboutit sur la nécessité d'ajouter principalement des cerces horizontales sur le fût. Le dimensionnement donne un câble tous les 70 cm environ. Cette alternative, obtenue par l'optimisation des études réalisées par des bureaux d'études, permet de limiter l'ouverture des fissures verticales qui ont pu être observées sur certains fûts en épreuve enceinte. De plus, les effets de la mise en place de cerces horizontales uniquement permet de limiter les effets négatifs (traction notamment) sur des points singuliers de la structure (TAM, dôme, radier,...). Les difficultés de mise en œuvre de cette solution, son coût et ses limites à réduire le taux de fuite global de l'enceinte peuvent être des points bloquants à sa qualification pour les prochaines VD3.

Cependant, cette solution peut apporter une réponse efficace dans le traitement des fissures verticales du fût, fuyardes en quantité non négligeable en épreuve sur certaines tranches.

L'amélioration de l'étanchéité du béton peut être traitée de différentes façons. Ainsi, il est possible d'appliquer sur l'intrados des revêtements de type organique ou composite ou des revêtements métalliques. Une autre solution actuellement utilisée sur certaines tranches est la mise en œuvre de produits d'imprégnation sur l'extrados de la paroi interne.

Enfin, une dernière solution serait de combiner plusieurs parades, précontrainte additionnelle et revêtement, produit d'imprégnation et humidification de la paroi. Cela permettrait de conjuguer les effets positifs de chacune des solutions tout en limitant (voire annulant) les points bloquants.

Amélioration de l'étanchéité des enceintes à double paroi – Etude comparative multicritère des parades

Les parades étudiées dans cette note ont permis de réaliser une comparaison des différentes solutions alternatives à partir de critères définis (faisabilité, efficacité, sûreté, analyse des risques et coûts). La réalisation d'un tableau reprenant les données connues permet d'attribuer un système de notation (code couleur) à chaque critère et pour chaque parade.

Au final, cette note conclut sur la faisabilité (en juin 2009) des différentes solutions étudiées. Ainsi, la solution la plus avancée techniquement et qui semble adaptée est le revêtement métallique conçu par EIFFEL malgré quelques améliorations à étudier.

Les produits d'imprégnation actuellement à l'étude sont également prometteurs. Cependant, afin de garantir une efficacité optimale de ces produits, leur application devrait se faire sur toute la surface de l'extrados afin de limiter les problèmes de contournement. De plus, cette solution n'est plus efficace lors de l'ouverture des fissures, le traitement des zones susceptibles de fissurer est donc nécessaire, ce qui limite l'intérêt de cette solution au cas de Belleville.

De manière générale, la diversité des propriétés de ces parades, des besoins et des particularités des tranches et l'état d'avancement des études font qu'il est difficile de choisir de façon tranchée l'une ou l'autre solution.

L'idée est donc d'avancer plusieurs études en parallèle afin de disposer d'un maximum de choix. Il se peut en effet qu'une solution adaptée à une tranche ne le soit pas du tout pour une autre.

7.2 Suites à donner

La précontrainte additionnelle, longtemps controversée, revient au goût du jour, entre autres, suite à la note [2] et au comportement observé à Flamanville 2 lors de l'épreuve en VD2. Des études complémentaires seront à réaliser, notamment concernant ses effets sur la structure et sa capacité à améliorer le taux de fuite de l'enceinte en épreuve, APRP et AG. De plus, une optimisation de cette solution en fonction des besoins des tranches plus particulièrement concernées peut encore être réalisée.

Sa qualification pour les prochaines VD3 risque d'être difficile mais à fin 2009, NUVIA TS nous fera part des conclusions d'une étude en interne sur le sujet. Si l'étude est suffisamment aboutie des essais à l'échelle 1 pourraient être rapidement prévus.

Le système proposé par EIFFEL devra être testé à l'échelle 1 puis sur une enceinte. Des mesures d'étanchéité et de tenue seront alors réalisées. Sa qualification d'ici 2015 reste possible.

La qualification des revêtements organiques (FOREVA et BELZONA®) ne sera sûrement pas réalisée pour les premières VD3. Mais les études se poursuivent notamment du point de vue toxicologique. Si les résultats sont concluants, leur application pourra se faire pour d'autres tranches plus récentes.

Amélioration de l'étanchéité des enceintes à double paroi – Etude comparative multicritère des parades

Annexe 1 Revêtement composite NUVIA TS FOREVA RELASTIC 300 modifié (document [5])

Tableau descriptif du Relastic 300 modifié

Critères évalués		Données Relastic
Composition du revêtement	Détail des composants	Revêtement microporeux de surface à base de liant hydraulique et résine Produit bicomposant à base de poudre (partie A) et de liant liquide (partie B).
	Avis toxicologique	- Valeurs de poussières alvéolaires totales comprises entre 30% et 70% de la VLEP Pas de risque d'exposition des travailleurs. - Teneur en soufre et halogènes : Conformité aux spécifications PMUC
Exigences fonctionnelles	Etanchéité	Perméabilité au CO ₂ : 1g / m ² / 24h Tenue jusqu'à une pression de 0.8Bars. Grande déformabilité du revêtement
	Adhérence	Bonne adhérence du revêtement sur support béton et acier. Contrainte d'adhérence > 1.5MPa
	Non libération de débris	Le revêtement ne libère pas de débris. Après vieillissement, pas d'émission de poussière, pas d'altération de surface
	Adaptation, pontage de fissures	Très bonne tenue à la fissuration. Pas d'endommagement jusqu'à une ouverture de fissure de 5mm.
	Adaptation, sous-pression	Grande souplesse et déformabilité du revêtement. Tenue jusqu'à une pression de 0.8Bars.
Propriétés complémentaires	Vieillessement	Pas de dégradation constatée sur ouvrages réalisés sur une période supérieure à 10 ans Pas d'émission de poussières après vieillissement
	Cloquage, décollement	Pas d'altération de surface à température ambiante
	Tenue aux APRP	Idem AG
	Situations sévères (AG)	- Après traitement thermique de 15 jours à 150°C (type AG), on conserve une adhérence d'environ 1.2MPa. - Pas de partie friable ni de fissuration après accident de température. - Quelques cloquages ponctuels à la surface après traitement thermique.
	Compatibilité avec revêtement existant	Sous réserve de l'état du revêtement existant : Adhérence du Relastic sur un revêtement type résine Epoxy : valeurs comparables à celles sur le béton (contrainte d'adhérence d'environ 1.6MPa)
	Extension de la solution	
	Réversibilité	La dépose du revêtement alternatif est possible, des essais sont en cours de réalisation pour optimiser la méthode mise au point..
	Pérennité, durabilité	Voir point « Vieillessement » ci-dessus Compatibilité chimique vis à vis du béton armé et l'acier (pH=12.5 protecteur)
Maintenance	Pas d'essai réalisé Le revêtement ne nécessite pas d'entretien	

Amélioration de l'étanchéité des enceintes à double paroi – Etude comparative multicritère des parades

Critères évalués		Données Relastic
Mise en œuvre	Contraintes sur site	La mise en œuvre n'est pas sensible aux variations de température (température d'application de 5° à 45°C) et d'hygrométrie (humidité relative de 0 à 100%)
	Sécurité, dosimétrie	<ul style="list-style-type: none"> - Pas de solvant ni d'odeur - Non cancérigène, mutagène, ou toxique pour la reproduction - Non explosif, non inflammable
	Préparation support	<ul style="list-style-type: none"> - Le support doit être débarrassé de toute partie friable, propre, dépoussiéré, sans graisse ni matière organique. Nettoyage à l'eau sous pression du béton - Les défauts de surface tels que bullage ou nids de cailloux doivent être ragrésés. - Avant application de la 1ère passe, la surface doit être au préalable humidifiée, mais non ruisselante.
Adaptation, singularités	Adaptation, singularités	<ul style="list-style-type: none"> A étudier plus en détail par la suite. Adhérence équivalente sur béton et acier. Le critère d'acceptation (non apparition de déchirure ni d'écaillage jusqu'à un déplacement de 5mm) est respecté avec la solution Relastic
	Coût	A réaliser avec l'appui d'une visite
	Durée des travaux	A réaliser avec l'appui d'une visite
	Déchets	A réaliser avec l'appui d'une visite

Amélioration de l'étanchéité des enceintes à double paroi – Etude comparative multicritère des parades**Bilan de la mesure de perméabilité à l'air des plaques FREYSSINET****I - Présentation :**

6 échantillons de Foreva Relastic 300 provenant de FREYSSINET ont été testés lors des essais de perméabilité. 3 échantillons de chaque configuration (épaisseur moyenne de 2,3mm ou de 4,8mm).

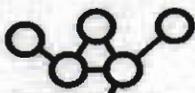
II - Synthèse des résultats

Référence	Taille	Epaisseur	Banc	Débit gazeux surfacique K (l/h.m ²)	Critère d'acceptation	Conclusion	Commentaires
PS4522-1	200x200mm	2,3mm	1	< au seuil de détection	< 0,05 l/h.m ²	Satisfaisant	Résultat satisfaisant mais plaque déformée après essai
PS4522-2	200x200mm	2,3mm	2	1,5*10 ⁶		Non Satisfaisant	Résultat non satisfaisant cela s'explique probablement par l'apparition d'une fissure sous la contrainte de la pression durant une nuit.
PS4522-3	200x200mm	2,3mm	1	< au seuil de détection		Satisfaisant	Résultat satisfaisant mais plaque déformée après essai
PS4523-1	200x200mm	4,8mm	1	< au seuil de détection		Satisfaisant	Résultat satisfaisant mais plaque déformée après essai
PS4523-2	200x200mm	4,8mm	2	< au seuil de détection		Satisfaisant	Résultat satisfaisant mais plaque déformée après essai
PS4523-3	200x200mm	4,8mm	2	< au seuil de détection		Satisfaisant	Résultat satisfaisant mais plaque déformée après essai

Amélioration de l'étanchéité des enceintes à double paroi – Etude comparative multicritère des parades

Annexe 2 Revêtements composites Belzona®

Fiche technique Belzona 3211®



BELZONA®
3211

L A G S E A L

**Protection flexible et sans joint
pour tous les types d'isolation
thermique**

Pour empêcher une détérioration physique de l'isolant car il est naturellement cassant, friable et généralement peu résistant, pour empêcher une absorption d'eau de l'isolant qui réduirait fortement son efficacité et entraînerait des problèmes de corrosion sur la structure métallique, pour éviter l'entrée d'huile ou d'autre liquide inflammable qui risquerait de provoquer une combustion spontanée, l'isolant doit être protégé sous étanchéité.

Les matériaux traditionnels de revêtement ont de nombreux inconvénients: mauvaise résistance aux chocs mécaniques, besoin de compétences et d'outillage spécifiques tels que: adhésifs, vis, rivets et produits d'obturation. Pour réaliser une résistance mécanique et une imperméabilisation, Belzona® a développé une solution éprouvée: le Belzona® 3211 (Lagseal).

Le Belzona® 3211 est un système polyvalent et unique pour encapsuler et protéger tous les types d'isolations thermiques. Ce système, posé à la brosse en 2 couches, renforcé avec une bande de fibre de verre, apporte une grande souplesse d'emploi pour l'étanchéité et la protection d'isolations thermiques.

Du fait de sa microporosité, Belzona® 3211 peut s'appliquer sur des surfaces humides. Il permet à l'humidité de s'évaporer et garde l'isolant sec. Il est utilisé dans les cas suivants:

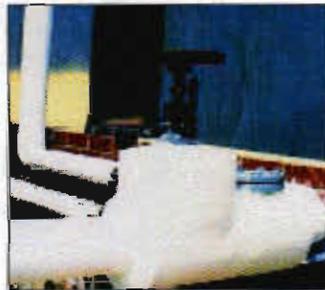
- CONDUITES DE VAPEUR
- CONDUITES D'ÉCHAPPEMENT
- ROBINETTERIE
- RÉSERVOIRS
- TUYAUTERIES
- CHAUDIÈRES



CONDUITES DE VAPEUR



CONDUITES D'ÉCHAPPEMENT



ROBINETTERIE



RÉSERVOIRS



TUYAUTERIE



CHAUDIÈRES

The Unconventional Alternative.

Belzona International, Ltd. Harrogate, HG1 4AY, England
Fax: +44 (0) 1423 505967 • Tel: +44 (0) 1423 567641
E-mail: Com@Belzona.co.uk

Belzona, Inc. Miami, Florida 33172, USA
Fax: (305) 599-1140 • Tel: (305) 594-4994
E-mail: Belzona@Belzona.com





BELZONA®
3211
L A G S E A L



BELZONA® SERIE 3000

Simplicité d'utilisation

- Facile à appliquer au pinceau ou au pistolet.
- Peut s'appliquer sur des surfaces humides.

Sureté d'emploi

- A base d'eau: donc sans danger et permettant un nettoyage facile des outils à l'eau.

Souplesse d'application

- Peut s'appliquer sur tous les revêtements calorifuges nouveaux ou existants sur les conduites de vapeur, de condensats ou tuyauteries froides ainsi que sur les tuyauteries de pétrole et de combustible, etc.
- Permet une encapsulation sans joint et facile des coudes, des t  s ou des brides là où les revêtements métalliques traditionnels sont inefficaces et longs à fabriquer.
- Peut s'appliquer sur des surfaces humides. Permet à l'humidité de s'évaporer et garde l'isolant sec et totalement efficace.



DISPONIBLE EN 16 KG UNITÉ TAILLE

Durabilité

- N'entretient pas la croissance de bactéries ou d'algues; fournit une finition hygiénique sur les revêtements de toile, etc, dans des milieux humides.
- Résistance excellente aux produits chimiques et aux huiles.
- Sa grande flexibilité réduit à un minimum les d  t  riations dues au choc. Résiste aux mouvements causés par les fluctuations de température et les vibrations au sein du système.
- Résiste à l'impact de la vapeur, aux rayons infrarouges et ultraviolets.

Accessoires

• Belzona® 9321 (Bande de renfort)

Une bande renforcée avec fibre de verre qui augmente la durabilité et la solidité des applications de Belzona® 3211 (Lagseal). Belzona® 9321 sert également de calibre d'épaisseur.



BS EN ISO 9002 - 1994
Certificate No. Q/09335



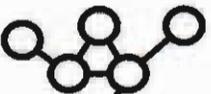
Copyright   1998 by Belzona International Ltd. All rights reserved. No part of this work may be reproduced or used in any form or by any means - graphic, electronic or mechanical including photocopying, recording, taping, or information storage and retrieval systems - without written permission of Belzona International, Ltd.

Belzona   is a registered trademark.

Printed from BEL Publication No. FB211

Amélioration de l'étanchéité des enceintes à double paroi – Etude comparative multicritère des parades

Fiche technique Belzona 1591®



BELZONA® 1591

**Le meilleur revêtement polymère
pour la protection anti-corrosion
à haute température**

Belzona® 1591 est le matériau le plus efficace pour combattre les effets de l'érosion corrosion à des pressions et températures élevées.

Belzona® 1591 a été conçu à l'origine pour l'industrie offshore de production de gaz et de pétrole, là où les problèmes de corrosion par l'eau de mer, abrasion et attaque chimique sont aggravés par des températures et pressions de service plus élevées que jamais. Belzona® 1591 satisfait non seulement aux besoins de cette industrie exigeante mais il résout aussi des problèmes auparavant impossibles à solutionner.

Dans d'autres industries comme la pétrochimie, les papeteries, la sidérurgie, les raffineries, la production d'énergie, Belzona® 1591 offre:

- une protection contre la corrosion dans des conditions d'immersion à des températures supérieures à 180°C (365°F)
- excellente résistance à une gamme importante de mélanges aqueux et d'hydrocarbures
- une résistance aux hautes pressions
- une aptitude à résister à une décompression rapide
- une résistance à la fatigue des cycles thermiques
- une résistance à l'érosion

Le système offre l'avantage supplémentaire d'une polymérisation à température ambiante se poursuivant durant la mise en service de l'équipement, ceci supprimant la nécessité d'un équipement de chauffage accessoire. Belzona® 1591 est le produit le plus significatif dans le développement de revêtements résistant à l'érosion corrosion.

Belzona® 1591 accroît la protection à des niveaux de température très élevés.



SEPARATEURS



TURBINES/POMPES



ECHANGEURS THERMIQUES

BALLONS SEPARATEURS
DE TORCHE

EVAPORATEURS

COLONNES D'ABSORPTION
DESSALEURS

The Unconventional Alternative.

Belzona Polymeric Ltd. Harrogate, HG1 4AY, England
Fax: +44 (0) 1423 505967 • Tel: +44 (0) 1423 567641
E-mail: Com@Belzona.co.uk

Belzona Inc. Miami, Florida 33172, USA
Fax: (305) 599-1140 • Tel: (305) 594-4994
E-mail: Belzona@Belzona.com

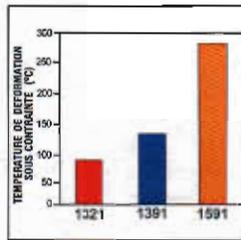




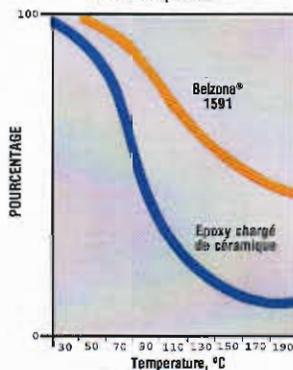
BELZONA®
1591



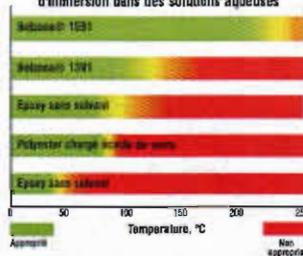
BELZONA® POLYMERES METALLIQUES SERIE 1000



Evolution de l'adhérence en fonction de la température



Approprié pour une utilisation en condition d'immersion dans des solutions aqueuses



Résistance exceptionnelle à la chaleur

- aucune déformation thermique jusqu'à 280°C (538°F)

Absorption d'humidité extrêmement faible

- les essais type "thermo-osmose" montrent une résistance importante au cloquage par rapport aux revêtements conventionnels
- convient pour l'emploi dans des systèmes d'eau pressurisée à des températures supérieures à 180°C

Excellente adhérence

- sur de nombreux supports métalliques
- adhérence maintenue à des températures élevées

Résistance à la pression

- le seul revêtement capable de résister à une décompression rapide de 30 bars à la pression atmosphérique à une température de 130°C (266°F) selon des essais indépendants

Facilité d'emploi

- les températures de déformation thermique, qui sont largement supérieures aux températures de polymérisation, permettent de terminer la polymérisation en service
- le système s'applique en une seule couche

Sécurité d'emploi

- formulation sans solvants et écologique, il élimine le risque de feu et réduit les risques d'inhalation
- possibilité de contrôler les manques et les défauts d'application
- réparations faciles des dommages mécaniques accidentels et défauts d'application

Autres systèmes de protection Belzona® contre l'érosion corrosion

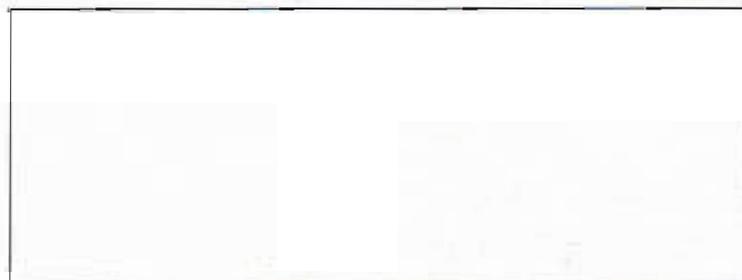
Belzona® 1321 jusqu'à 90°C (194°F)

Belzona® 1391 jusqu'à 130°C (266°F)

Belzona® 1341 pour améliorer le rendement jusqu'à 60°C (140°F)



BS EN ISO 9002 - 1994
Certificate No. Q/09335



Copyright © 1998 by Belzona International Ltd. All rights reserved. No part of this work may be reproduced or used in any form or by any means - graphic, electronic or mechanical including photocopying, recording, taping, or information storage and retrieval systems - without written permission of Belzona International, Ltd.

Belzona® is a registered trademark.

Printed from BEL Publication No. P1591

Amélioration de l'étanchéité des enceintes à double paroi – Etude comparative multicritère des parades

Annexe 3 Tableau de synthèse des études et notation

CATEGORIES		FAISABILITE								EFFICACITE				SURETE		RISQUES				COUTS par tranche	
parades	critères	délais			mise en œuvre			avis toxicologique	disponibilité / prestataires éventuels	qualification MO	tenue structurelle	étanchéité	besoin d'une parade complémentaire	pérennité / durée de vie	respect des critères généraux / points bloquants	REX	pérennité de la structure	impacts sur la sûreté / accidents	actions sur des éléments annexes (autre que la structure)	environnement	études, mise en œuvre, maintenance
		études	travaux	maintenance	contraintes	servitudes	nombre de personnes														
précontrainte additionnelle (câbles horizontaux uniquement)		1 an	2 ans	contrôle tous les 10 ans	faible espace de la zone chantier (EEE)	néant	probablement 20	néant à priori	NUVIA TS serait le seul à pouvoir réaliser les travaux et la maintenance	MO qualifiée exigée, probablement interne à Freyssinet	peu sollicité en épreuve et en accident	maintien d'une compression (horizontale et verticale) minimale de 1,0 MPa en épreuve en zone courante du fût	oui : incapacité quasiment démontrée (au TAM et à la ceinture torique)	durée de vie supérieure à 30 ans	les critères sont respectés (localement tout du moins)	aucun retour sur centrales, solution présente sur des ouvrages de type pont ou château d'eau	mise en traction ponctuelle (ceinture torique, TAM, dôme) mais légère	fissures maintenues fermées sur le fût et certaines sur la sous-ceinture du dôme en épreuve	actions négatives sur l'utilisation du TAM (risques d'augmentation de l'ovalisation)	néant à priori	
					conditions d'ambiance difficiles						exposé à une forte humidité (EEE)		application nécessaire d'un revêtement	retension possible des câbles remplacement des câbles possible	le bénéfice apporté au taux de fuite de toute la structure en épreuve est à vérifier (zones singulières)		actions néfastes des ancrages et déviateurs sur le fût	difficultés supplémentaires à circuler dans l'EEE			
revêtement RELASTIC 1000m²		qualification à priori pas possible pour les VDS	environ 4 semaines hors servitudes		contraintes de température et d'hygrométrie acceptées	nettoyage de la surface	5-10 personnes à priori	défavorable : poussières alvéolaires + quartz, évolution possible	distribué par NUVIA TS : origine, PAREXLANKO SA	pas de formation particulière à priori	adhérence sur béton+acier > 1,5 MPa sur béton et acier	bonne perméabilité du produit seul au CO2 et vapeur d'eau (taux de fuite < 0,05 l/h/m²)	capacité à répondre seul aux exigences sur le long terme	pas de dégradations en situation normale à plus de 10 ans	manque d'infos : résistance au feu, toxicologie	mise en œuvre ponctuelle sur des ouvrages ordinaires sans réel REX	pas d'action sur la structure à priori	tenue correcte et conservation des propriétés en accident de température à priori diminution du taux de fuite en épreuve (tenue à l'ouverture des fissures)	néant	déchets : pots	
					travaux sur l'intrados de l'enceinte interne	ragréage des défauts humidification de la paroi					tenue à la fissuration 5 mm adhérence = 1,2 MPa et qq cloquages après traitement thermique (150°C - 15j)			possibilité de reprise et de pose de nouvelle couche							
revêtement métallique EIFFEL		1 an	13 semaines		contraintes de température et d'hygrométrie acceptées	dépense des revêtements existants (au moins en périphérie)	7 encadrants	favorable à priori (EPDM qualifié par EDF)	EPDM disponible assez largement	pas de formation lourde nécessaire	système de fixation assurant la tenue de l'ensemble à la sous-pression	pas d'action de la fissuration sur le système	capacité à répondre seul aux exigences sur le long terme	resserrage et remplacement éventuel des boulons	essai sur le système complet à réaliser	utilisation de l'EPDM sur les joints du TAM	actions ponctuelles sur la structure dues aux percements réguliers de la paroi actions sur le béton lors de la mise en pression du BR si mise en œuvre trop approximative	les fissures sont isolées	action possible sur les traversées		
					travaux sur l'intrados de l'enceinte interne		32 exécutants		système complet conçu chez EIFFEL		la surpression de l'enceinte aura pour effet de plaquer les tôles sur le béton le béton sera peu sollicité vérification du joint EPDM en épreuve	système supposé limiter au maximum les fuites incertitudes sur étanchéité joint EPDM	traitement éventuel (revêtement organique ou composite) des zones singulières (ceinture torique, dôme)	remplacement complet de l'EPDM possible (tous les 10 ans)	pas de point bloquant	tôles en acier inoxydable proches du liner existant sur 900	système complet nouveau				
revêtement métallique GTT					difficultés en zones singulières	dépense de l'existant		favorable à priori (acier + système de fixation)	GTT unique fournisseur à priori	MO de GTT	tenue du système isolant+feuillelet sous condition d'ambiance des méthaniers	garantie pour le gaz	capacité à répondre seul aux exigences	prévu pour 40 ans sur les cuves de stockage	critères à priori respectés	application sur des enceintes de confinement cylindrique	actions ponctuelles par les systèmes d'ancrage	fissures isolées	action possibles sur les traversées		
					type de fixation du feuillelet sur le béton / acier	ragréage des défauts							applicabilité en zone singulière à vérifier mise en œuvre possible d'une triple membrane verre/alu/verre supplémentaire : protection thermique étanchéité incertaine en périphérie		système de fixation à étudier	tôles en acier inoxydable proches du liner existant sur 900		le taux de fuite pourrait être nettement réduit			
revêtement BELZONA 3211 système renforcé		qualification à priori pas possible pour les VDS	7 jours de séchage minimum		application : T>5°C ; HR<80%	traitement de surface : nettoyage + belzona 3911		à priori sans danger (à base d'eau)	plusieurs distributeurs en France	pas de formation lourde nécessaire	résistance au déchirement 2,5 N/mm² résistance à la vapeur 10 MN/sg	perméabilité à la vapeur d'eau 2,199 Perms	si grande surface	> 20 ans		application sur chaudières, tuyauteries,...	pas d'action sur la structure	néant	déchets : pots		
revêtement BELZONA 1591		qualification à priori pas possible pour les VDS	24h minimum de durcissement		application et durcissement : T>18°C	traitement de surface (nettoyage, sablage)		sans solvant	plusieurs distributeurs en France		adhésion sur acier résistance chimique résistance à la compression : 655 kg/cm² résistance à la flexion : 318 kg/cm²	faible absorption d'humidité	si grande surface	réparations possibles		évaporateurs, turbines, colonnes d'absorption dessaleurs	pas d'action sur la structure	néant	déchets : pots		
produit d'imprégnation BIP					mise en œuvre entre 5 et 35°C	nettoyage de la surface		favorable	distribué par MAX PERLES	application facile, pas de qualification spécifique		perméabilité à l'air /3 coefficient de sorption /2 perméabilité à l'eau /60	capacité à répondre seul aux exigences mais ne tient pas à la fissuration		imprégnation sur BULMUR et St Alban et Belleville (été 2009)						
produit d'imprégnation NOVAPRIM A			7 jours de durcissement à 20°C		mise en œuvre entre 15 et 30°C	nettoyage de la surface		favorable mais à revoir suite au REX	distribué par RESIPOLY CHRYSOR	application facile, pas de qualification spécifique		perméabilité à l'air /5 coefficient de sorption /10 perméabilité à l'eau /11	capacité à répondre seul aux exigences mais ne tient pas à la fissuration	réparations possibles	imprégnation sur BULMUR et Belleville (été 2009)						
produit d'imprégnation PURIGOSOL			séchage en 24h sous 20°C		T > 5°C	nettoyage de la surface		favorable	distribué par Sika	application facile, pas de qualification spécifique		perméabilité à l'air /4 coefficient de sorption /5 perméabilité à l'eau /5	capacité à répondre seul aux exigences mais ne tient pas à la fissuration		imprégnation sur BULMUR et Belleville (été 2009)						
COMBINAISON																					
revêtement + précontrainte																					
humidification de la paroi + produit d'imprégnation						mise en place du réseau d'évacuation d'eau nettoyage de la zone aspergée						non démontrée	capacité à répondre seul aux exigences mais ne tient pas à la fissuration			durée de vie à estimer	durée de vie à estimer	durée de vie à estimer	eau contaminée à traiter		