



Diffusé le : Voir code barres ci-dessus

Entité émettrice: SEPTEN GS GC

Rédacteur : E. LAMBERT

Nbre de pages : 17

Domaine d'application : Génie-civil

Nbre d'annexes : 0

Titre : INCIDENCE DU DEFAUT DE PAREMENT EXTERNE DE L'ENCEINTE DE GRAVELINES 2 SUR LE COMPORTEMENT DE L'OUVRAGE. SYNTHESE DES ETUDES.

| | | | |
|---------------------|----------|------------------------------|--------------------------------|
| ENSGGC100427 | A | ← Référence Code Projet → | E235/005961/eaffaire RE |
|---------------------|----------|------------------------------|--------------------------------|

Type de document : **Note d'étude**

Mots clés : Défaut – Parement - Enceinte

Résumé : Cette note est une synthèse des études confiées au bureau d'étude COB sur l'étude de l'incidence du défaut de parement relevé sur l'enceinte de Gravelines 2, sur le comportement de l'ouvrage.

| 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 |
| E. LAMBERT 03/01/2011 | | J.L. VALFORT 03/01/2011 | | P. LAZZARINI 04/01/2011 | | | |

EVOLUTIONS DES TROIS DERNIERS INDICES

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

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

| | | |
|---|--|---------------|
| Archivage long : OUI | Archivé au FDU : OUI | Copyright EDF |
| 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"/> Restreint | L'initiateur établit une liste explicite des destinataires. Chacun d'eux peut étendre la diffusion sous sa responsabilité (sur la base d'une liste explicite et avec information de l'initiateur). | |
| <input checked="" type="checkbox"/> Interne | Ne peut être transmis à l'extérieur d'EDF/DPI (et entités autorisées) que par une personne habilitée. | |

Ce document contient des informations sensibles relevant du secret et juridiquement protégées. Il est réservé à l'usage exclusif des personnes désignées comme destinataires du document et/ou autorisées à y accéder. Il est illégal de photocopier, distribuer, divulguer, ou d'utiliser de toute autre manière les informations contenues dans ce document sans accord du service émetteur de la DIN.

| | | | | |
|--|------------------------------|---|---|--------------------------|
| EDF SEPTEN | Note d'étude ENSGGC100427 | | Indice A | Page 2/17 |
| INCIDENCE DU DEFAUT DE PAREMENT EXTERNE DE L'ENCEINTE DE GRAVELINES 2 SUR LE COMPOTEMENT DE L'OUVRAGE. SYNTHESE DES ETUDES. | | | | |
| FICHE DE GESTION | | | | |
| Important pour la sùreté (IPS) | | OUI <input checked="" type="checkbox"/> | NON <input type="checkbox"/> | |
| Cette note modifie ou exprime une exigence de Sùreté, de Radioprotection ou d'Environnement ? : | | | | |
| | | OUI <input type="checkbox"/> | NON <input checked="" type="checkbox"/> | |
| Appliquer le processus O4a | | | | |
| Document HPIC : | | OUI <input type="checkbox"/> | NON <input checked="" type="checkbox"/> | |
| Vérification | demandée | OUI <input type="checkbox"/> | Par EDF | <input type="checkbox"/> |
| Indépendante | | NON <input checked="" type="checkbox"/> | Hors EDF | <input type="checkbox"/> |
| | | | En ligne | <input type="checkbox"/> |
| | | | En différé | <input type="checkbox"/> |
| | | | En cours | <input type="checkbox"/> |
| | | | Effectuée | <input type="checkbox"/> |
| Responsable vérification (NOM, SERVICE / SOCIÉTÉ) : | | | | |
| Prédifffusion du présent indice : | | OUI <input checked="" type="checkbox"/> | NON <input type="checkbox"/> | |
| Après de : CIPN GC Gellez A. | | | | |
| Existe-t-il un dossier d'étude associé à la note à cet indice ? : | | OUI <input type="checkbox"/> | NON <input checked="" type="checkbox"/> | |
| Contrôle linguistique renforcé : | | OUI <input type="checkbox"/> | NON <input checked="" type="checkbox"/> | |

INCIDENCE DU DEFAUT DE PAREMENT EXTERNE DE L'ENCEINTE DE GRAVELINES 2 SUR LE
COMPORTEMENT DE L'OUVRAGE. SYNTHÈSE DES ETUDES.

SYNTHÈSE

Cette note constitue la synthèse des études menées dans le cadre de l'analyse de l'incidence du défaut relevé sur le parement externe de l'enceinte de Gravelines 2. Il s'agit d'un défaut concernant un volume de béton de l'enceinte, présentant des propriétés mécaniques atypiques.

L'étude de l'influence de ce défaut sur la tenue mécanique de l'ouvrage ainsi que sur son étanchéité, ont été confiées au bureau d'études Coyne et Bellier.

Les résultats de cette étude montrent que la tenue de l'enceinte n'est pas remise en cause par la présence de ce défaut, et que l'ancrage du liner métallique n'est pas modifié dans la zone du défaut. Par conséquent, l'étanchéité de l'enceinte est maintenue.

INCIDENCE DU DEFAUT DE PAREMENT EXTERNE DE L'ENCEINTE DE GRAVELINES 2 SUR LE
COMPORTEMENT DE L'OUVRAGE. SYNTHÈSE DES ETUDES.**SOMMAIRE**

| | |
|---|-----------|
| 1. Introduction | 5 |
| 1.1 Contexte | 5 |
| 2. Données d'entrée de l'étude | 5 |
| 3. Démarche adoptée | 5 |
| 4. Chargement | 5 |
| 4.1 Caractérisation de la résistance du béton atypique | 5 |
| 4.1.1 Précontrainte | 6 |
| 4.1.2 Consoles de pont | 6 |
| 4.2 Combinaisons de sollicitations | 6 |
| 4.2.1 Efforts sismiques | 8 |
| 4.2.2 Impact d'avion | 8 |
| 5. Modélisation aux éléments finis calculs linéaire | 9 |
| 5.1 Géométrie et maillage..... | 9 |
| 5.2 Cas de charge | 9 |
| 5.2.1 Poids propre | 9 |
| 5.2.2 Charge d'exploitation..... | 9 |
| 5.2.3 Précontrainte | 9 |
| 5.2.4 Pression interne unitaire | 10 |
| 5.2.5 Retrait unitaire..... | 10 |
| 5.2.6 Température service normal | 10 |
| 5.2.7 Température APRP | 10 |
| 5.2.8 Poussée du Liner | 11 |
| 5.3 Résultats..... | 11 |
| 6. Modélisation aux éléments finis calculs non linéaire élastique. . | 11 |
| 6.1 Modélisation du béton..... | 11 |
| 6.2 Cas de charge | 13 |
| 6.3 Résultats..... | 13 |
| 7. Synthèse du comportement | 17 |

INCIDENCE DU DEFAUT DE PAREMENT EXTERNE DE L'ENCEINTE DE GRAVELINES 2 SUR LE
COMPORTEMENT DE L'OUVRAGE. SYNTHESE DES ETUDES.

1. Introduction

1.1 Contexte

Dans le cadre de travaux de rénovation du parement externe du bâtiment réacteur de la tranche 2 du CNPE de Gravelines, une zone de béton atypique a été relevée.

Les inspections visant à caractériser le défaut ont révélé que la dimension de béton atypique était de l'ordre de 18 m linéaire de part et d'autre de la nervure 3 à une altitude située à 37,80m sur une hauteur d'environ 50 cm réf [4].

Une étude a été confiée au cabinet Coyne et Bellier afin d'analyser l'influence de ce défaut sur la tenue mécanique de l'enceinte, et sa capacité à assurer ces fonctions de sûreté.

2. Données d'entrée de l'étude

Note COB pour calage des hypothèses.

[1] 12 391 4318 RP 001 Enceinte interne Tranche 2 Gravelines – Etude de l'incidence du défaut du parement externe à 37,80 m sur le comportement mécanique de la paroi - Etudes analytiques des conséquences du défaut de bétonnage.

[2] 12 391 4318 RP 002 Enceinte interne Tranche 2 Gravelines – Etude de l'incidence du défaut du parement externe à 37,80 m sur le comportement mécanique de la paroi – Etude sur base modélisation « Eléments finis » linéaire.

[3] 12 391 4318 RP 003 Enceinte interne Tranche 2 Gravelines – Etude de l'incidence du défaut du parement externe à 37,80 m sur le comportement mécanique de la paroi – Etude sur base modélisation « Eléments finis » non linéaire.

[4] EMEGC101594 Défaut du parement externe de l'enceinte de Gravelines 2 - circonscription de la zone de béton atypique.

3. Démarche adoptée

L'étude s'est déroulée en 3 phases. Une première phase s'est appuyée sur l'expertise technique du bureau d'études COB, et sur l'historique de l'ouvrage afin de déterminer via les chargements subis sans dommage par l'ouvrage au cours de sa construction et de son exploitation, quelle pouvait être la résistance du béton atypique.

Dans un deuxième temps, un calcul aux éléments finis sur un modèle simplifié d'enceinte a été réalisé en adoptant un comportement linéaire du béton atypique.

Au vu des résultats en contrainte supérieurs à la résistance estimée du béton atypique, un calcul non linéaire a été mené, en adoptant une loi de comportement de type Sargin pour le béton atypique.

4. Chargement

4.1 Caractérisation de la résistance du béton atypique

En tenant compte de l'historique de cet ouvrage, on détermine les contraintes qu'a pu subir cette zone de béton atypique. Cette étape permet de caler les hypothèses pour les calculs

INCIDENCE DU DEFAUT DE PAREMENT EXTERNE DE L'ENCEINTE DE GRAVELINES 2 SUR LE COMPORTEMENT DE L'OUVRAGE. SYNTHESE DES ETUDES.

aux éléments finis. Les principaux épisodes susceptibles d'avoir sollicité significativement cette zone du fût sont détaillés ci-dessous.

4.1.1 Précontrainte

Dans la zone concernée par le défaut, et en particulier sur la nervure 3 un câble de précontrainte est ancré. L'effort appliqué à cet ancrage, conduit dans cette zone à une distribution de contraintes engendrant dans le béton des contraintes de l'ordre de 15 MPa.

4.1.2 Consoles de pont

Les consoles de pont au nombre de 36 sont ancrées au niveau 40,00 m environ. La partie inférieure des consoles est ancrée dans la levée 21 à 38,80 m environ et la partie supérieure ancrée dans la levée 22 à 40 m environ.

Lors de l'utilisation du pont, la zone de béton atypique subie une contrainte de l'ordre de 8,2 MPa, qui cumulée à l'effort de précontrainte verticale et au poids de la partie supérieure du fût et du dôme, aboutissent à une contrainte dans la zone de l'ordre de 14,8 MPa.

4.2 Combinaisons de sollicitations

L'ensemble des combinaisons de sollicitations considérées sont rappelées ci-dessous. Les notations et cumuls sont cohérents avec celles du rapport définitif de sûreté (Edition VD2 et VD3)

La liste des sollicitations est détaillées ci-dessous :

- G Charges gravitaires permanentes
- S Charges gravitaires non permanentes (en construction, en exploitation réacteur à l'arrêt ou en fonctionnement)
- F action de la précontrainte
- P0 pression d'exploitation
- T0 Température en exploitation (y compris la température extérieure)
- V Sollicitations climatiques normales
- W Sollicitations climatiques extrêmes
- SI Sollicitations sismiques
- P Pression en cas d'accident de perte de réfrigérant primaire (APRP)
- Température en cas d'accident de perte de réfrigérant primaire (APRP)
- M Sollicitations dues à un projectile
- E sollicitations dues à l'explosion

INCIDENCE DU DEFAUT DE PAREMENT EXTERNE DE L'ENCEINTE DE GRAVELINES 2 SUR LE
COMPORTEMENT DE L'OUVRAGE. SYNTHESE DES ETUDES.

Les combinaisons sont regroupées dans le tableau ci-dessous :

| COMBINAISONS | G | S | F | P | T | P ₀ | T ₀ | V | W | S _i | M | E | Type de sollicitation | |
|--|---|---|---|------|---|----------------|----------------|---|---|----------------|---|---|-----------------------|---------|
| | | | | | | | | | | | | | Normale | Majorée |
| 1. Charges permanentes et non permanentes | 1 | 1 | 1 | | | | | | | | | | X | |
| 2. Service normal | 1 | 1 | 1 | | | 1 | 1 | | | | | | X | |
| 3. Sollicitations climatiques normales | 1 | 1 | 1 | | | 1 | 1 | 1 | | | | | X | |
| 4. séisme normal admissible | 1 | 1 | 1 | | | 1 | 1 | | | 0,5 | | | X | |
| 5. Epreuve à froid | 1 | 1 | 1 | 1,15 | | | | | | | | | X | |
| 6. APRP | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | | | | X | |
| 7. Séisme majoré | 1 | 1 | 1 | | | 1 | 1 | | | 1 | | | | X |
| 8. APRP majoré | 1 | 1 | 1 | 1,5 | | | 1 | | | | | | | X |
| 9. APRP et séisme majoré | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | 1 | | | | X |
| 10. Sollicitations climatiques exceptionnelles | 1 | 1 | 1 | | | 1 | 1 | | 1 | | | | | X |
| 11. Projectile | 1 | 1 | 1 | | | 1 | 1 | | | | 1 | | | X |
| 12. Explosion | 1 | 1 | 1 | | | 1 | 1 | | | | | 1 | | X |

La combinaison 13, rupture de tuyauterie secondaire n'est pas considérée car les efforts de rupture se développent loin de la zone du défaut.

Les combinaisons de sollicitations (3. Sollicitations climatiques normales) et (10. Sollicitations climatiques extrêmes) sont couvertes respectivement par les sollicitations (4. Séisme normal) et (7. Séisme majoré). De la même façon, la combinaison (12 – explosion) est couverte par la combinaison (7 – séisme majoré).

La combinaison (1. Charge permanente et non permanente) correspond essentiellement à la phase construction.

La combinaison (11. Projectile) comprend le missile turbine qui n'affecte que le dôme et n'est pas considéré. Seul l'impact d'avion est étudié.

Les combinaisons à considérer sont donc :

En sollicitation normale

INCIDENCE DU DEFAUT DE PAREMENT EXTERNE DE L'ENCEINTE DE GRAVELINES 2 SUR LE
COMPORTEMENT DE L'OUVRAGE. SYNTHESE DES ETUDES.

2. Service normal (y compris gradient thermique et les efforts de pont roulant)
4. Séisme normal admissible
5. Epreuve à froid
6. APRP

En sollicitation majorée

7. Séisme majoré
8. APRP majoré
9. APRP + séisme majoré
11. Projectile (impact avion)

Parmi l'ensemble des combinaisons d'action applicable, on ne sélectionne que celles où la qualité du béton de la zone de défaut peut jouer un rôle.

4.2.1 Efforts sismiques

Le chargement sismique ne génère pas de contraintes significatives. Moins de 1 MPa en contrainte verticale et en cisaillement.

4.2.2 Impact d'avion

D'après les notes de calcul initiales, la prise en compte du chargement sous impact d'avion conduit aux contraintes suivantes :

Des contraintes tangentielles

Intrados

Contrainte maximale 15,6 MPa

Contrainte minimale 12,0 MPa

Extrados

Contrainte maximale 11,6 MPa

Contrainte minimale 2,5 MPa

Contraintes verticales

Intrados

Contrainte maximale 11,4 MPa

Contrainte minimale 8,3 MPa

Extrados

Contrainte maximale 6,8 MPa

Contrainte minimale -0.3 MPa (traction)

Les efforts sismiques pour le séisme majoré sont très faibles au niveau 37,80m, ils seront encore plus faibles pour le séisme normal admissible. Les combinaisons avec le séisme sont donc négligées

4. Séisme normal admissible
7. Séisme majoré
9. APRP + séisme majoré.

INCIDENCE DU DEFAUT DE PAREMENT EXTERNE DE L'ENCEINTE DE GRAVELINES 2 SUR LE COMPORTEMENT DE L'OUVRAGE. SYNTHÈSE DES ÉTUDES.

La combinaison 11 impact d'avion ne sollicite pas le béton à des valeurs plus fortes que la mise en précontrainte ou le fonctionnement du pont.

La combinaison 8 APRP majoré est une combinaison considérée pour vérifier le dimensionnement des aciers passifs ou actifs. Dans cette configuration, le béton est tendu sous l'effet de la pression 1,5 P et le béton n'intervient plus dans la résistance. La qualité du béton n'intervient donc pas dans ce type de vérification et la combinaison est donc négligée.

Les combinaisons 2. service normal, 5. épreuve à froid et 6. APRP sont plus spécifiquement étudiées.

5. Modélisation aux éléments finis calculs linéaire

L'approche analytique présentée dans la note réf [1] est affinée à l'aide d'un modèle éléments finis simplifié de la paroi de l'enceinte interne. réf [2].

Reprenant les conclusions de l'approche analytique, la résistance du béton atypique est prise égale à 15 MPa avec un module instantané de 28240 MPa et un béton sain avec un module instantané de 38000 MPa.

5.1 Géométrie et maillage

Pour les deux calculs aux éléments finis, l'enceinte est modélisée à l'aide d'éléments coques multi couches. 3 modèles sont réalisés pour tenir compte des 3 types de chargements subis par l'ouvrage et qui dépendent de 3 modules d'élasticité différents. Charges à long terme (précontrainte, poids propre, retrait) Charges à court terme (montée en pression de l'enceinte) et chargement thermique.

Le calcul est mené en plusieurs étapes pour intégrer les différents types de chargements et les appliquer sur un modèle linéaire ou non linéaire doté d'un module de béton adapté. Chaque étape repart de l'état de contraintes déterminé à l'étape précédente.

5.2 Cas de charge

5.2.1 Poids propre

Le poids propre de l'ouvrage est considéré (fût + dôme + ceinture torique) ainsi que le poids du rail du pont roulant ainsi que les consoles. Le poids du pont roulant est pris en compte dans sa configuration la plus défavorable par rapport au défaut. A savoir, des galets situés au droit du défaut, et un excentrement de la charge du côté du défaut.

5.2.2 Charge d'exploitation

Les charges d'exploitation concernent le chargement du pont lourd lors des opérations de RGV par exemple. Elles ne sont utilisées que lors du calcul de la combinaison service normal. Le pont est supposé non chargé en épreuve et en APRP.

5.2.3 Précontrainte

La précontrainte est modélisée en intégrant les pertes élastiques et de relaxation ainsi que les pertes différées. Les pertes différées sont estimées sur la base des mesures d'auscultation de Gravelines 2 et extrapolées à partir de celles connues de Chinon par application d'un coefficient réducteur de 12% correspondant au rapport des modules d'Young des ouvrages)

INCIDENCE DU DEFAUT DE PAREMENT EXTERNE DE L'ENCEINTE DE GRAVELINES 2 SUR LE COMPORTEMENT DE L'OUVRAGE. SYNTHESE DES ETUDES.

Dans la modélisation, la précontrainte est modélisée par une pression à l'extrados représentative de l'effort de précontrainte horizontale, et par une force linéique en partie supérieure représentative de la précontrainte verticale.

5.2.4 Pression interne unitaire

La pression interne représente le cas de chargement en pression en APRP ou en épreuve ainsi que l'effet de fond provoqué par le dôme.

Surtension des câbles

La surtension dans les câbles est prise en compte et modélisée de la même façon que la pression unitaire.

5.2.5 Retrait unitaire

Le retrait appliqué est calculé par extrapolation des mesures issues de Chinon (TR4) seules données disponibles et comparables à Gravelines 2.

| | Direction | E (retrait +fluage isotrope) ($\mu\text{m/m}$) |
|--------|-------------|--|
| 20 ans | verticale | 244 |
| | horizontale | 244 |
| 40 ans | verticale | 340 |
| | horizontale | 340 |

Le cas de charge est appliqué au modèle (mécanique avec module élastique à long terme) par une température uniforme négative sur la paroi (-100°C pondéré de 0,244 ou 0,340).

5.2.6 Température service normal

Les conditions de service normal hiver sont

$T_{int}=30^{\circ}\text{C}$ température imposée

$T_{ext}=-15^{\circ}\text{C}$ échanges conducto-convectifs avec la paroi

5.2.7 Température APRP

Les conditions thermiques sont les suivantes

$T_{ext}=-15^{\circ}\text{C}$ échanges conducto convectifs avec la paroi)

En intrados le scénario accidentel est le suivant

| T (s) | T_{int} ($^{\circ}\text{C}$) |
|-------|----------------------------------|
| 0 | 30 |
| 15 | 132 |
| 100 | 136 |
| 300 | 136 |
| 1000 | 126.5 |
| 2000 | 107 |
| 5000 | 103 |
| 7000 | 97.5 |
| 10000 | 92 |

INCIDENCE DU DEFAUT DE PAREMENT EXTERNE DE L'ENCEINTE DE GRAVELINES 2 SUR LE
COMPOTEMENT DE L'OUVRAGE. SYNTHESE DES ETUDES.**5.2.8 Poussée du Liner**

En situation accidentelle APRP, la poussée du liner est prise en compte. Ce cas de charge est intégré dans le modèle sous forme d'une pression équivalente en intrados, et une force linéique au sommet du cylindre.

5.3 Résultats

En service normal, les contraintes sont faiblement modifiées par le défaut. Les contraintes tangentielles qui sont réduites de 25 % dans la zone du défaut, se répartissent de part et d'autre sans majoration importante. Les moments de flexion ou efforts tranchant sont faiblement modifiés par la zone de béton 15 MPa.

En épreuve, les compressions diminuent et la zone défectueuse reste comprimée. Les moments de flexion ou efforts tranchant sont faiblement modifiés par la zone de béton 15 MPa.

En APRP, le calcul linéaire élastique conduit à des contraintes de compressions fortes à l'intrados (38 MPa en zone courante, ou 28 MPa dans la zone de béton atypique) associées à des tractions sur le parement externe. L'aspect très pessimiste vis-à-vis des compressions maximales sous l'effet des déformations imposées du calcul élastique, conduit l'étude à utiliser des lois de comportements non linéaire plus réalistes du béton afin d'obtenir des contraintes réduites et des déformations plus réalistes.

C'est l'objet de la note d'étude réf[3].

6. Modélisation aux éléments finis calculs non linéaire élastique.

L'objectif du recours à une loi de comportement de type Sargin, est d'estimer une enveloppe de l'état de déformation en compression du béton en limitant la valeur de compression maximale de la zone. Le but est de vérifier, à l'aide de l'estimation des déformations maximales subies par le béton atypique, que l'état de fissuration du béton est acceptable vis-à-vis de l'état limite ultime de résistance et aussi vis-à-vis des conditions d'appui du liner dans la zone (ancrage du liner).

6.1 Modélisation du béton

Le béton sain et le béton atypique sont modélisés avec une loi de Sargin.

La loi de Sargin définie par l'EN1992-1-1 permet de représenter correctement le comportement non linéaire du béton :

$$\sigma_c = f_{ck} \cdot F(\varepsilon) \text{ avec } F(\varepsilon) = \frac{k \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c1}} \right)^2}{1 + (k-2) \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c1}} \right)} \quad (\text{EN1992-1-1})$$

$$\text{Le module tangent est } E_c = \left(\frac{\partial \sigma_c}{\partial \varepsilon} \right)_{\varepsilon=0} = \frac{k \cdot f_{ck}}{\varepsilon_{c1}}$$

**INCIDENCE DU DEFAUT DE PAREMENT EXTERNE DE L'ENCEINTE DE GRAVELINES 2 SUR LE
COMPOTEMENT DE L'OUVRAGE. SYNTHESE DES ETUDES.**

D'où $k = 1,1 \cdot \frac{E_{cm} \varepsilon_{c1}}{f_{ck}}$. (en tenant compte d'un module tangent 10% plus fort que E_{cm})

$$E_{cm} = 11026 \cdot f_{cm}^{0,3} \text{ et } \varepsilon_{c1} = \min \{0,7 \cdot f_{cm}^{0,31} \cdot 10^{-3} ; 2,8 \cdot 10^{-3}\}$$

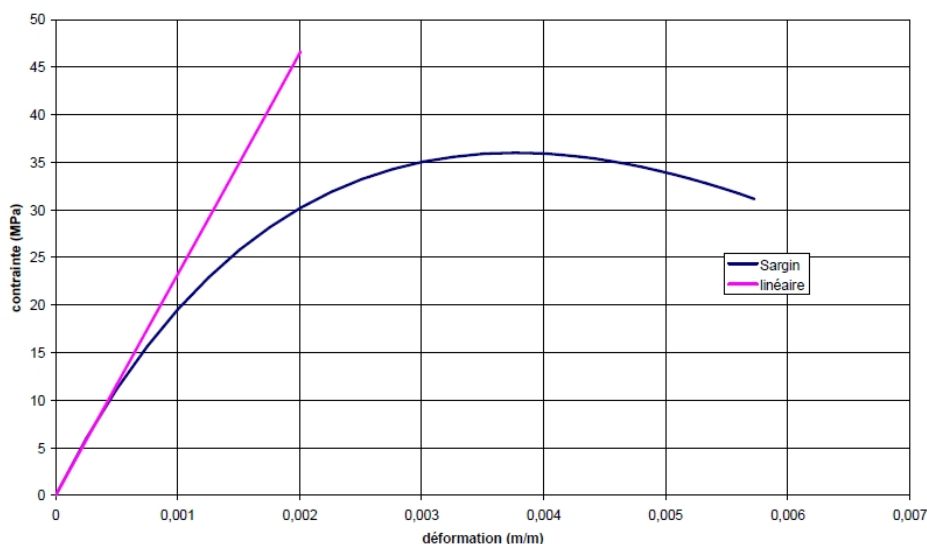
La valeur de E_{cm} est adaptée de façon à représenter la valeur mesurée du module à savoir 38000 MPa pour le béton sain et 28240 Mpa pour le béton atypique.

L'effet du fluage sous effet thermique est traité en considérant un module $E_{c,th} = \frac{E_{cm}}{(1 + \varphi_{th})}$ et

en modifiant ε_{c1} en $\varepsilon_{c1,th} = \varepsilon_{c1} \cdot (1 + \varphi_{th})$.

Les courbes correspondantes au comportement du béton sont les suivantes :

loi de Sargin - Cas thermique accidentel - bon béton



loi de Sargin - Cas thermique accidentel - "béton à 15 MPa"

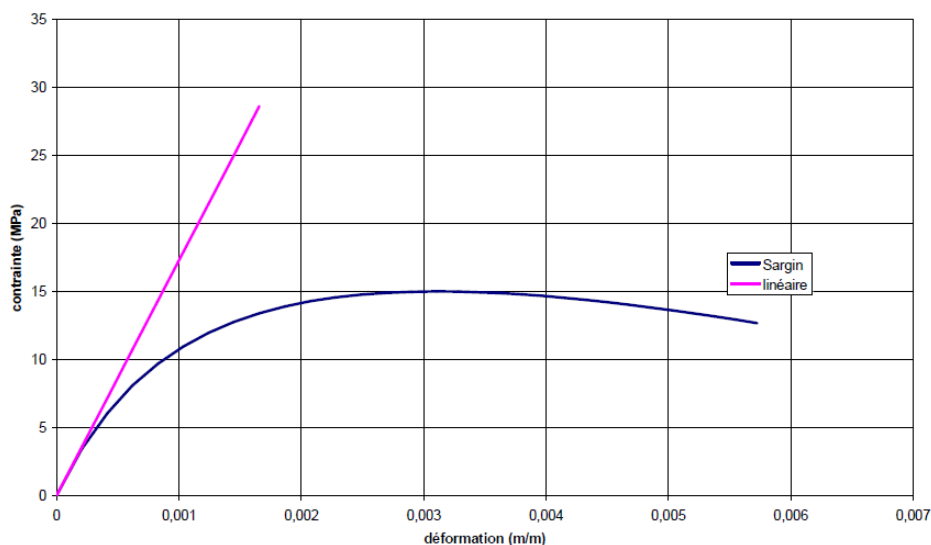


Fig : 1 Loi de Sargin pour calcul élastique non-linéaire bon béton au dessus, béton atypique au dessous.

INCIDENCE DU DEFAUT DE PAREMENT EXTERNE DE L'ENCEINTE DE GRAVELINES 2 SUR LE
COMPORTEMENT DE L'OUVRAGE. SYNTHESE DES ETUDES.

6.2 Cas de charge

Les cas de charges utilisés sont les mêmes que pour l'étude linéaire, par contre la seule combinaison étudiée est le cas APRP à 40 ans, en raison de son aspect sollicitant vis-à-vis de la zone de béton atypique.

6.3 Résultats

Les résultats significatifs sous forme de graphique et tableaux sont présentés ci-dessous. Comme attendu, les contraintes sont plafonnées dans la zone de béton atypique, pour permettre une estimation plus réaliste des déformations (Fig 2. et 4..) Celles-ci sont augmentées avec le recours à la loi de Sargin. (Fig 3. et 4.)

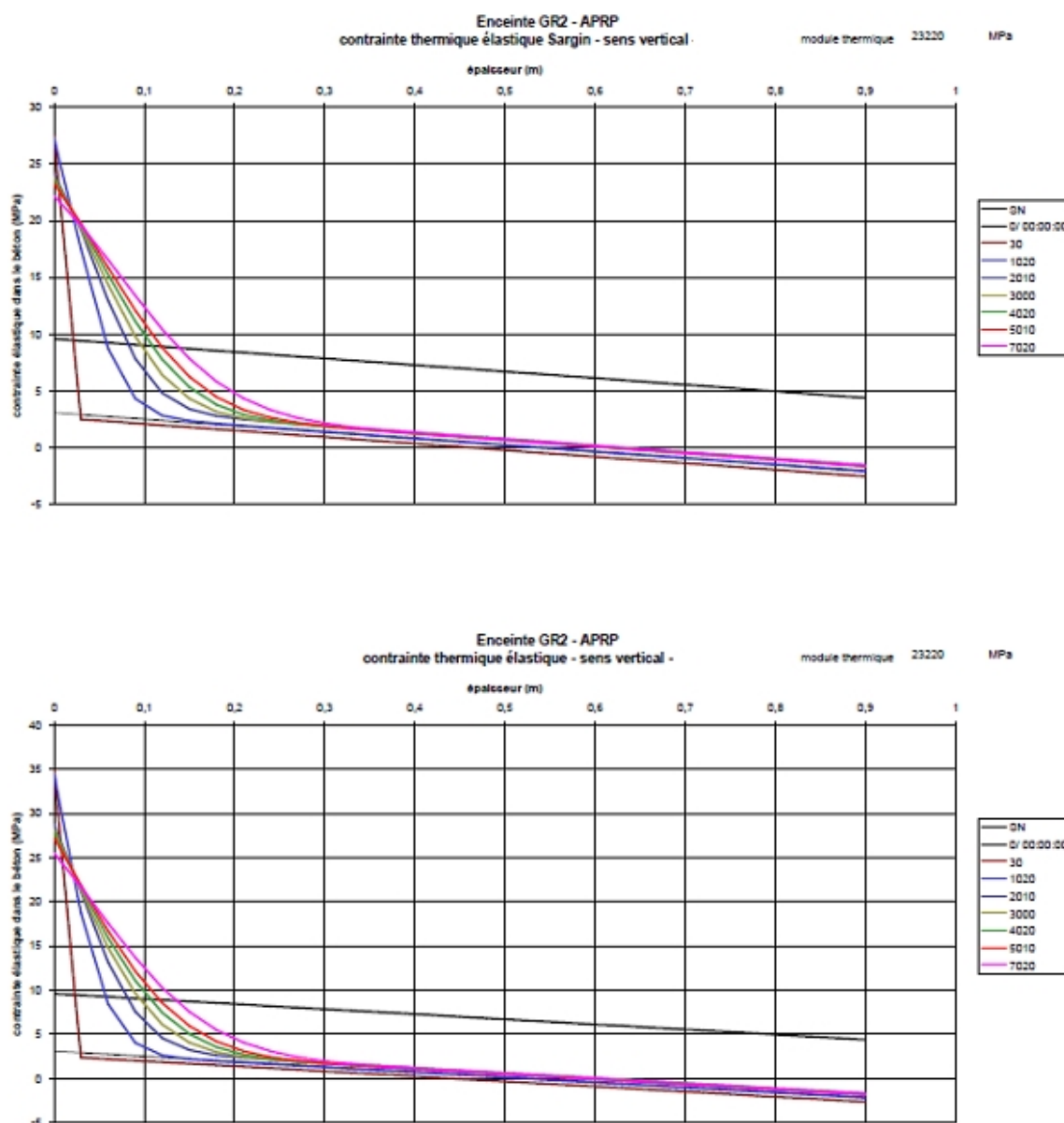


Fig 2. Comparaison contraintes verticales bon béton avec prise en compte loi de Sargin (au dessus) et comportement élastique (au dessous)

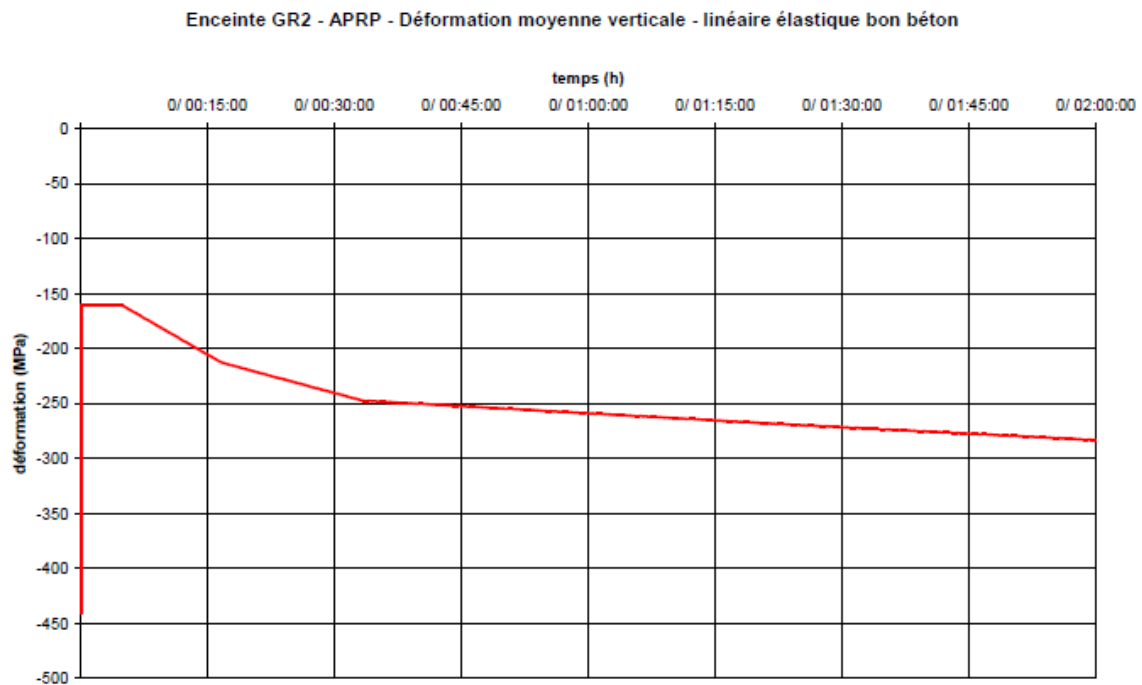
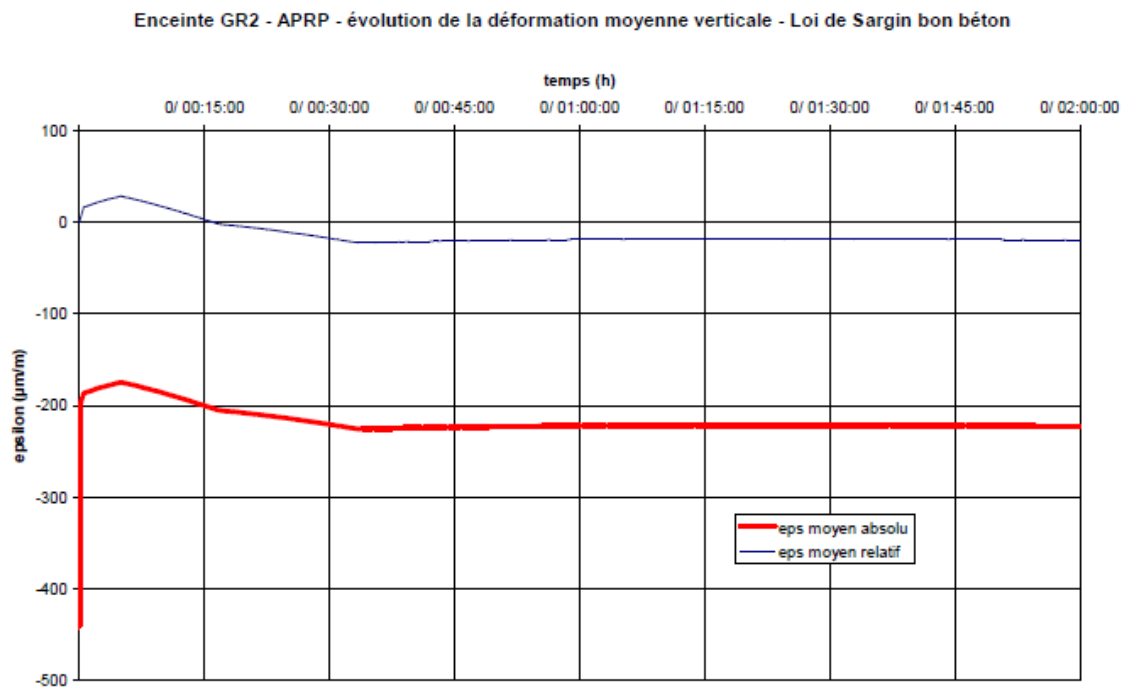
INCIDENCE DU DEFAUT DE PAREMENT EXTERNE DE L'ENCEINTE DE GRAVELINES 2 SUR LE
COMPORTEMENT DE L'OUVRAGE. SYNTHESE DES ETUDES.

Fig 3. Comparaison déformations verticales bon béton avec prise en compte loi de Sargin (au dessus) et comportement élastique (au dessous)

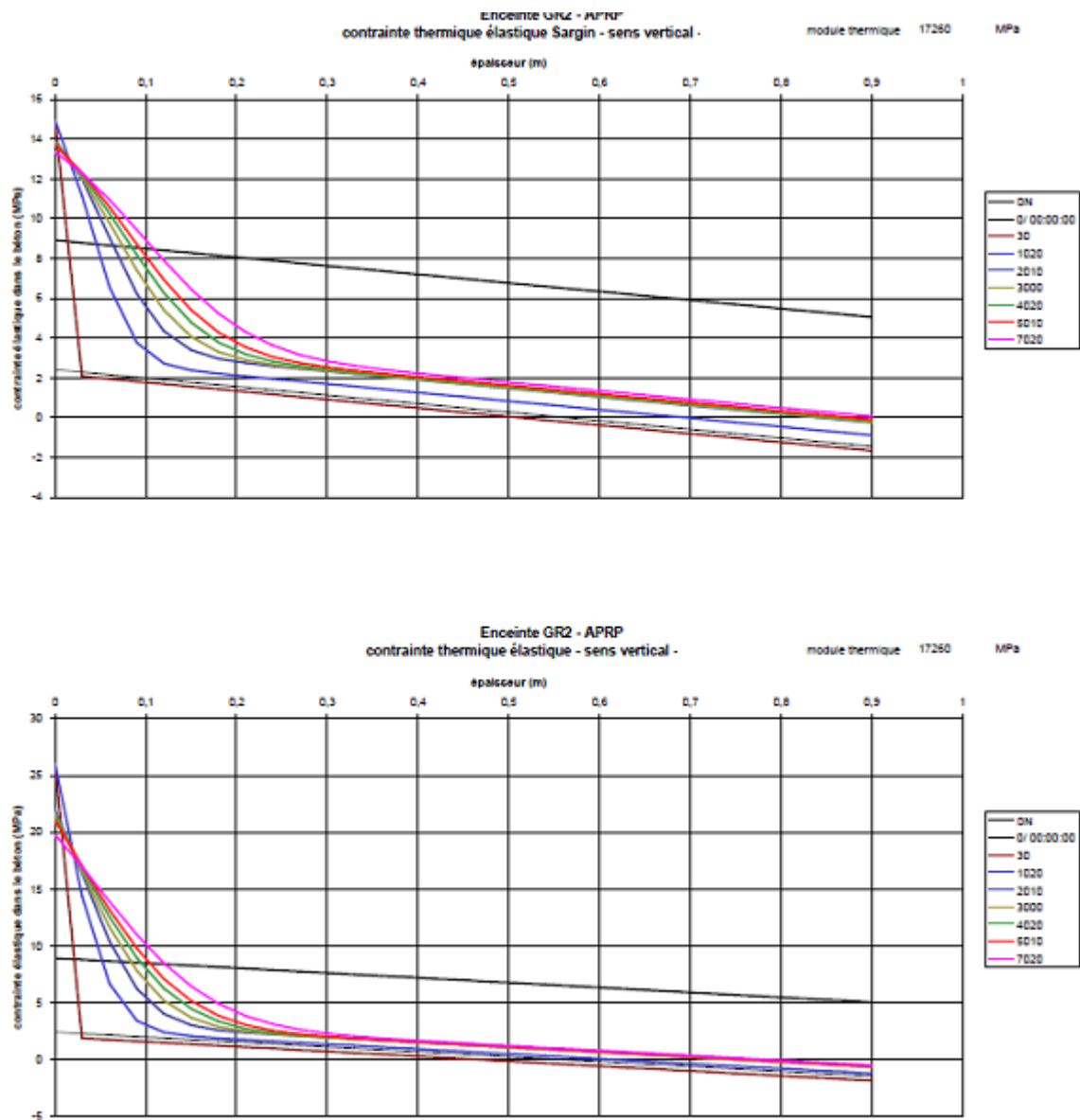
INCIDENCE DU DEFAUT DE PAREMENT EXTERNE DE L'ENCEINTE DE GRAVELINES 2 SUR LE
COMPORTEMENT DE L'OUVRAGE. SYNTHESE DES ETUDES.

Fig 4. Comparaison contraintes verticales béton atypique avec prise en compte loi de Sargin (au dessus) et comportement élastique (au dessous)

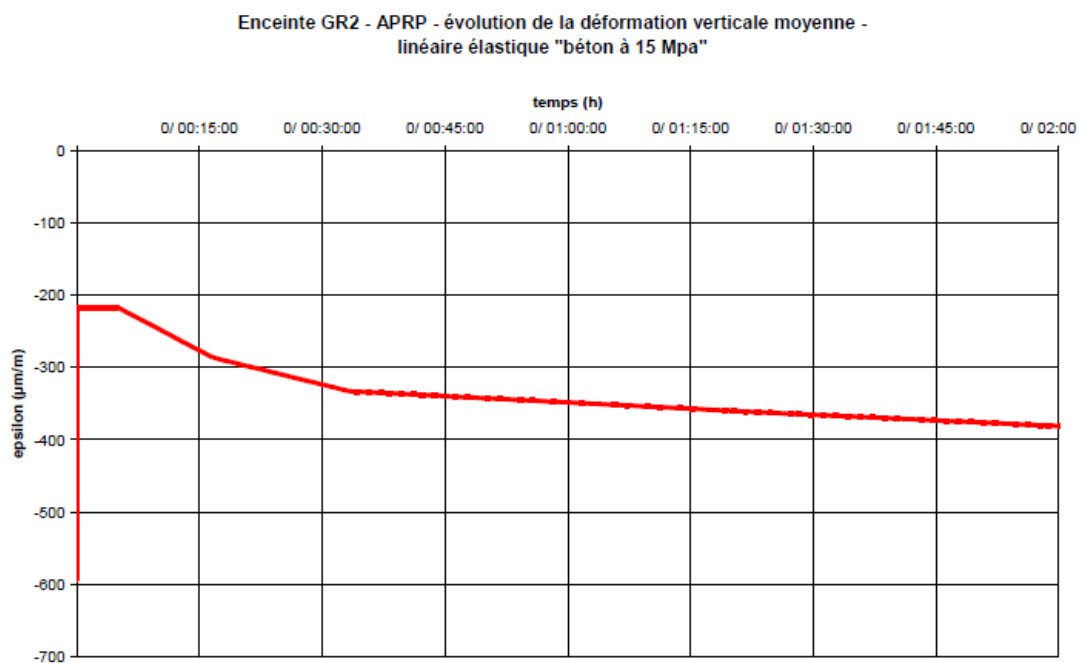
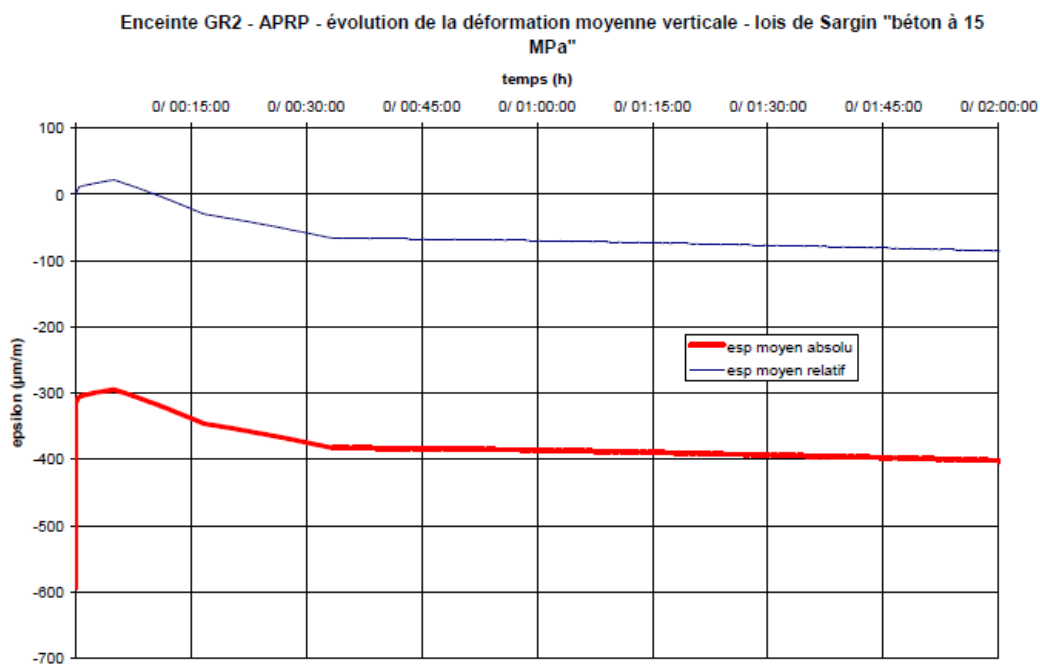
INCIDENCE DU DEFAUT DE PAREMENT EXTERNE DE L'ENCEINTE DE GRAVELINES 2 SUR LE
COMPOTEMENT DE L'OUVRAGE. SYNTHESE DES ETUDES.

Fig 5. Comparaison déformations verticales bon béton avec prise en compte loi de Sargin (au dessus) et comportement élastique (au dessous)

INCIDENCE DU DEFAUT DE PAREMENT EXTERNE DE L'ENCEINTE DE GRAVELINES 2 SUR LE
COMPOTEMENT DE L'OUVRAGE. SYNTHESE DES ETUDES.**Tableau des contraintes moyennes maximales en intrados aux différents temps du scénario APRP**

| | | T(s) | | | |
|---------------------|-----------------------|--------|--------|--------|--------|
| | | 1000 | 2000 | 5000 | 7000 |
| Zone béton atypique | σ_z (MPa) | -15,34 | -13,92 | -13,74 | -13,00 |
| | σ_θ (MPa) | -12,75 | -12,36 | -12,14 | -12,09 |
| Zone béton sain | σ_z (MPa) | -29,90 | -24,45 | -22,44 | -21,05 |
| | σ_θ (MPa) | -28,84 | -25,06 | -23,99 | -23,27 |

Tableau des déformations moyennes maximales en intrados aux différents temps du scénario APRP

| | | T(s) | | | |
|---------------------|----------------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|
| | | 1000 | 2000 | 5000 | 7000 |
| Zone béton atypique | ε_z | $-1,28.10^{-3}$ | $-1,00.10^{-3}$ | $-9,9.10^{-4}$ | $-8,97.10^{-4}$ |
| | ε_θ | $-9,57.10^{-4}$ | $-8,5.10^{-4}$ | $-8,2.10^{-4}$ | $-8,0.10^{-4}$ |
| Zone béton sain | ε_z | $-1,01.10^{-3}$ | $-8,2.10^{-4}$ | $-7,4.10^{-4}$ | $-6,86.10^{-4}$ |
| | ε_θ | $-9,59.10^{-4}$ | $-8,5.10^{-4}$ | $-8,2.10^{-4}$ | $-8,03.10^{-4}$ |

La compression maximale dans la zone de béton atypique atteint 15 MPa dans le sens tangentiel ou vertical au début de l'accident (au lieu de 28 MPa avec le modèle linéaire) puis reste quasiment constant à 14 MPa à 2 heures.

Il est à noter que les déformations maximales en compression dans la zone de béton atypique sont de $1,3.10^{-3}$ dans la zone de béton atypique et $1,03.10^{-3}$ $\mu\text{m}/\text{m}$ dans la zone de béton sain, par conséquent on remarque que si la contrainte maximale en compression du béton atypique est atteinte, en revanche les déformations associées $\varepsilon_z=1,3.10^{-3}$ $\mu\text{m}/\text{m}$ demeurent largement inférieures à celles admises comme caractérisant la rupture ($3,5.10^{-3}$ $\mu\text{m}/\text{m}$). Les conditions d'ancrages du liner métallique ne sont donc pas modifiées dans la zone de béton atypique.

7. Synthèse du comportement

Les études résumées ci-dessus permettent de démontrer que la zone de béton atypique n'a pas d'impact sur la capacité de l'enceinte à assurer ses fonctions de sûreté. La tenue structurelle du béton n'est pas remise en cause et les conditions de fonctionnement structurel du liner ne sont pas modifiées. Ces études ont été menées avec des hypothèses enveloppes qui assurent la robustesse de ce résultat.

Le jugement favorable porté sur le comportement de l'ouvrage en tenant compte de la zone de béton atypique est conforté par la position de la zone concernée. En effet, l'état de contrainte dans cette zone est largement régularisé. Cette zone ne supporte pas de localisation d'effort important comparables à ceux portés par les zones singulières de l'enceinte (par exemple TAM, ceinture torique, gousset).

Enfin, le bon REX sur le comportement de l'enceinte de Gravelines 2 lors des épreuves enceinte, ainsi que l'absence d'anomalie ou particularité au niveau des actions de surveillance de l'enceinte, concourent à assurer que le comportement de l'enceinte est satisfaisant.