

CLUB CAST3M 2011

Modélisation du comportement d'une enceinte de confinement d'un réacteur nucléaire de la construction jusqu'à l'épreuve.

Julien CLEMENT

Stage de fin d'étude d'Ingénieur ESTP réalisé à l'IRSN

Encadrant Georges NAHAS



Judi 24 Novembre 2011

Plan

- Introduction
- Présentation de la géométrie et du maillage
- Présentation du calcul thermique au jeune âge
- Présentation du chargement de la précontrainte
- Présentation du comportement différé de l'enceinte
- Présentation du chargement de pression ultime
- Conclusion

Introduction

- Le bâtiment réacteur (BR) et plus spécialement l'enceinte de confinement constitue la troisième et la dernière barrière de confinement contre le relâchement éventuel des produits radioactifs dans l'environnement.
- L'efficacité de son étanchéité, surtout en cas de fonctionnement accidentel, est un élément essentiel pour la sûreté nucléaire.
- L'origine du risque vient du fait qu'au cours d'un accident grave, l'enceinte de confinement peut être soumise à plusieurs types de sollicitations qui dépassent sa pression de dimensionnement.

Introduction

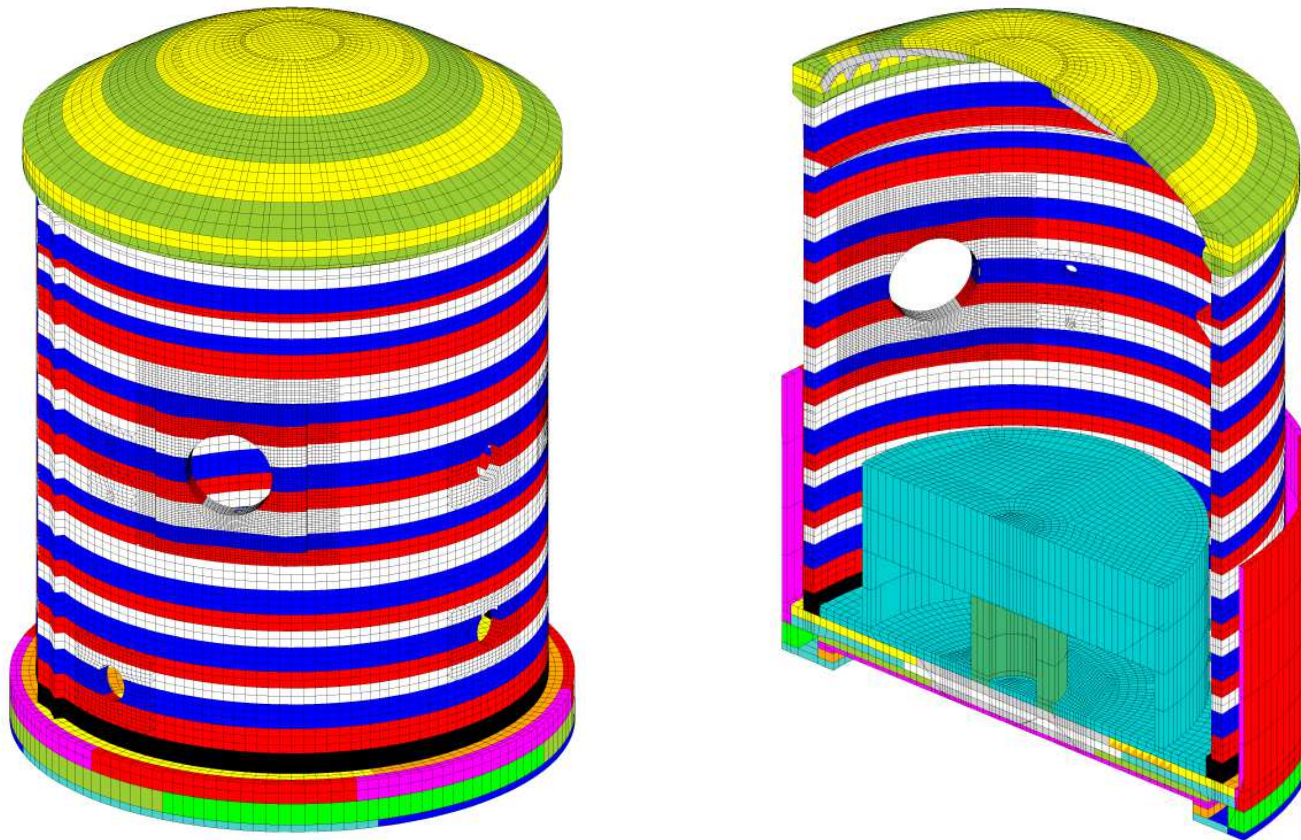
- **Modélisation de l'enceinte de confinement de la construction jusqu'à la fin d'exploitation.**
 - Modélisation des levées de bétonnage de l'enceinte.
 - Évaluation de la température à cœur du béton lors de la construction. (évaluation du risque RSI, fissuration).
 - Application de la précontrainte par phase de tension.
 - Évaluation du comportement différé du béton à 40 ans.
 - Application du chargement accidentel en pression.
- **Les calculs réalisés utilisent une démarche multi-échelle intégrée qui a pour but d'appréhender le comportement de la structure avec différents niveaux de détails, en distinguant la zone courante de l'enceinte, les spécificités du Tampon d'accès des matériels et enfin la fermeture de ce dernier dans un seul calcul.**
- **Ce sont des calculs par éléments finis utilisant le logiciel CAST3M version 2011 développé au CEA.**

Présentation de la géométrie et du maillage

- **Modélisation à partir des plans et documents techniques mis à disposition.**
 - Découpage du volume en 51 plots et levées, dont les pré-dalles du dôme.
 - Modélisation de l'ensemble du ferrailage en 267 nappes.
 - Démarche multi-échelle intégrée pour le tampon d'accès matériel.
 - Modélisation de l'ensemble de la précontrainte du radier, du fût et du dôme.
 - Intégration d'un modèle local du système de fermeture de l'accès matériel, capable de représenter fidèlement le serrage des clames lors de la mise en service.
- **Modèle adaptatif dont la précision est modifiée en intervenant sur quelques paramètres.**

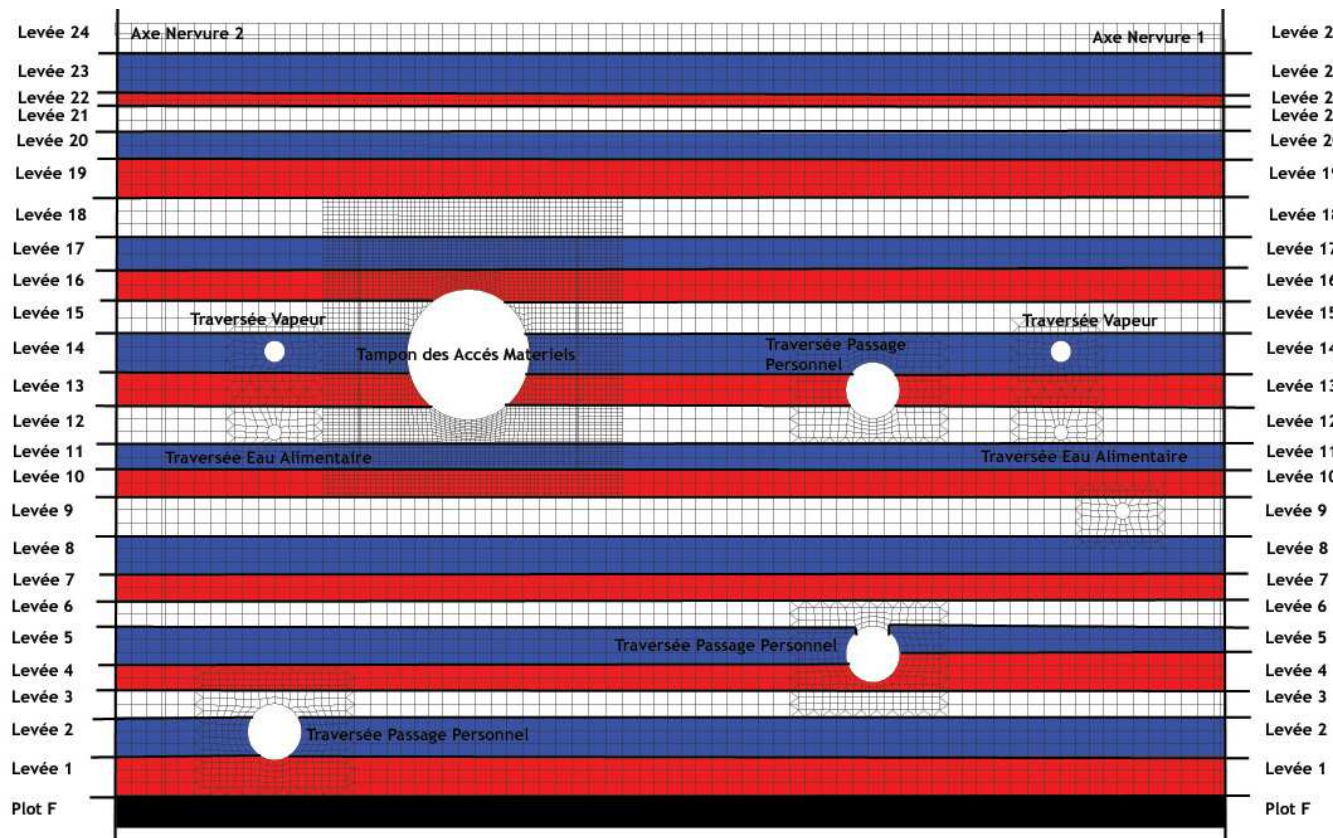
Présentation de la géométrie et du maillage

- Modélisation des 51 levées du phasage de construction.



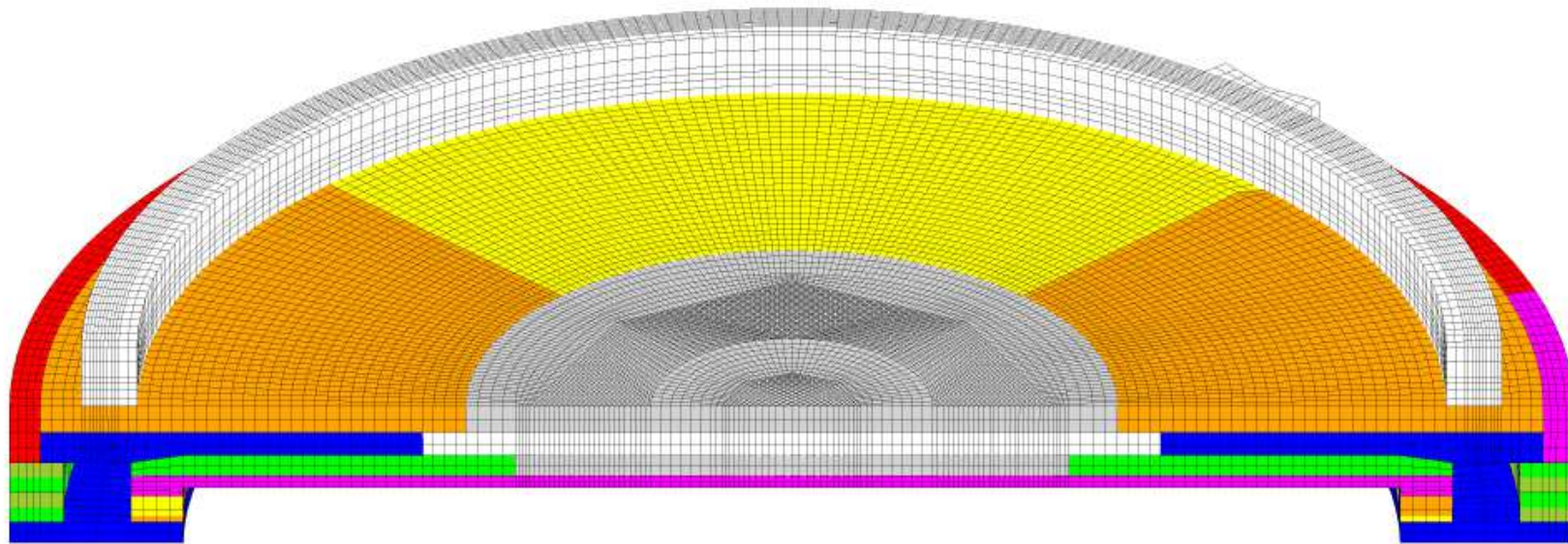
Présentation de la géométrie et du maillage

- Modélisation des 51 levées du phasage de construction



Présentation de la géométrie et du maillage

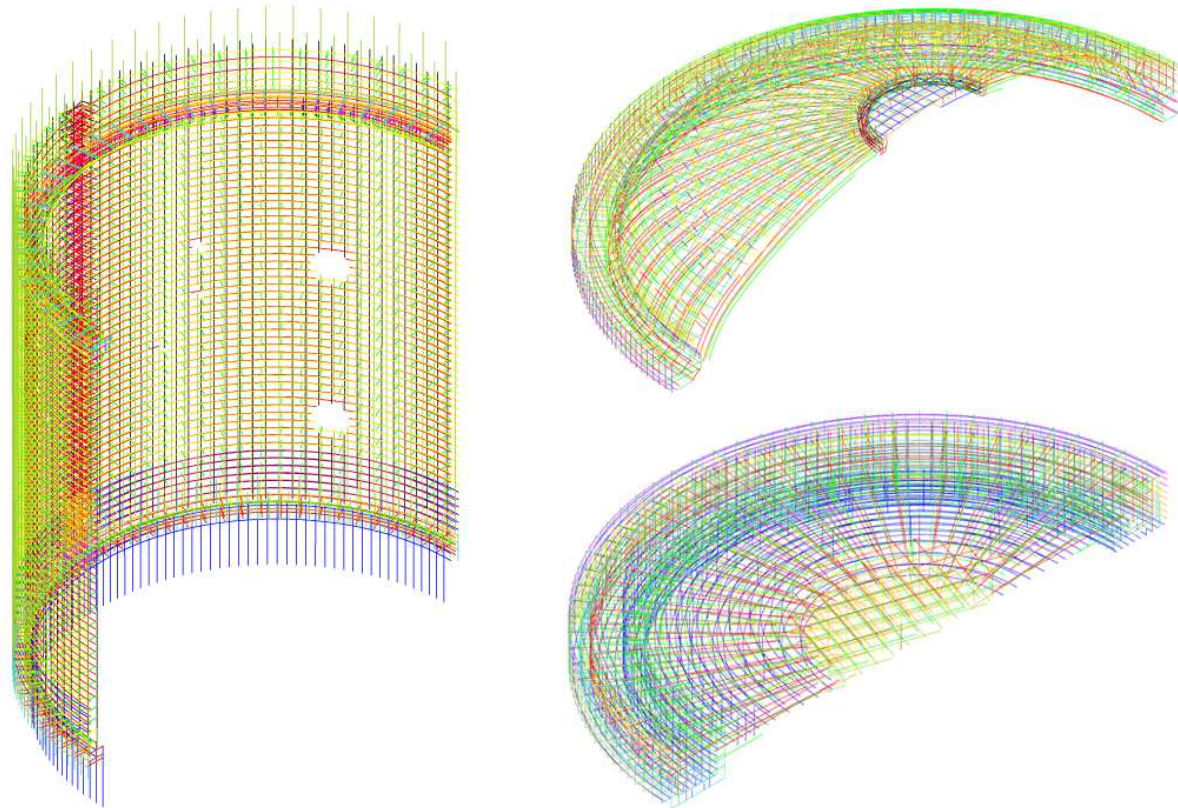
- Modélisation du radier d'une enceinte de confinement d'un réacteur nucléaire



COUPE A 50 GON

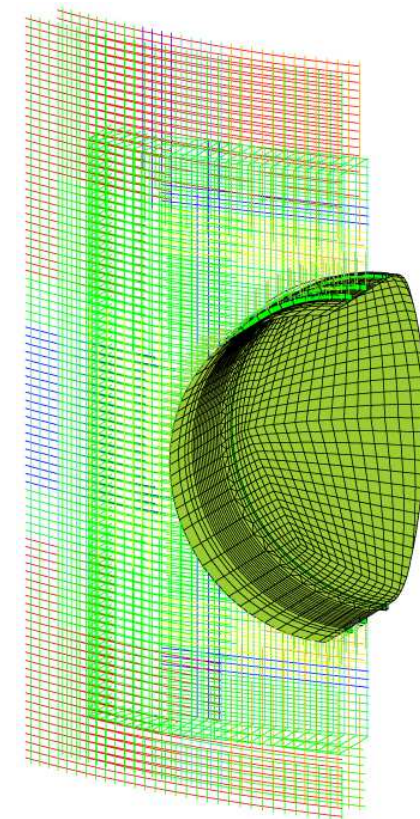
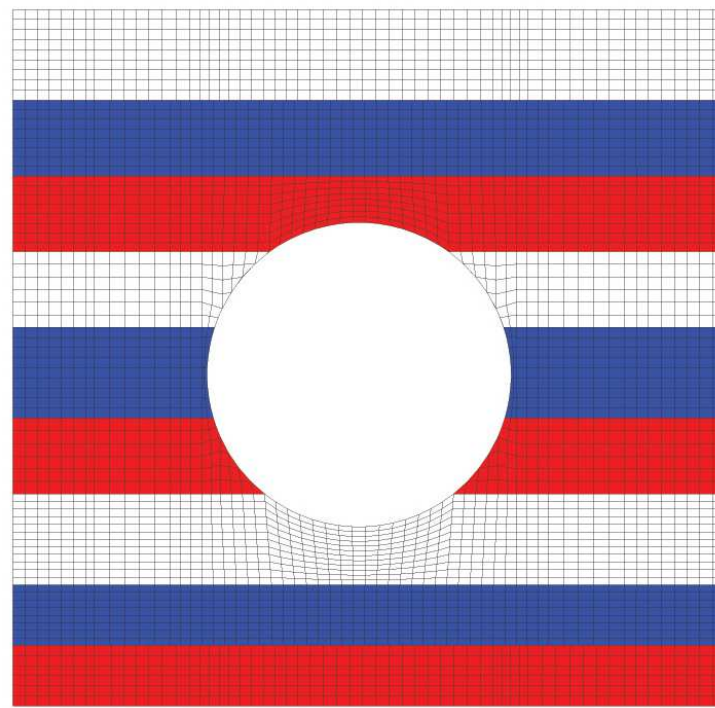
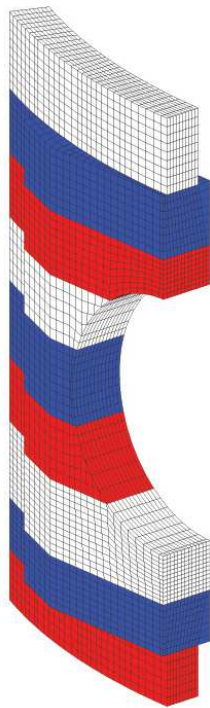
Présentation de la géométrie et du maillage

- Le ferrailage contient 267 nappes maillées d'après l'ensemble des plans d'exécution.
- Possibilité de réduire le nombre de barres maillées tout en gardant la section résistante de la nappe par l'emploi d'un système de coefficients.



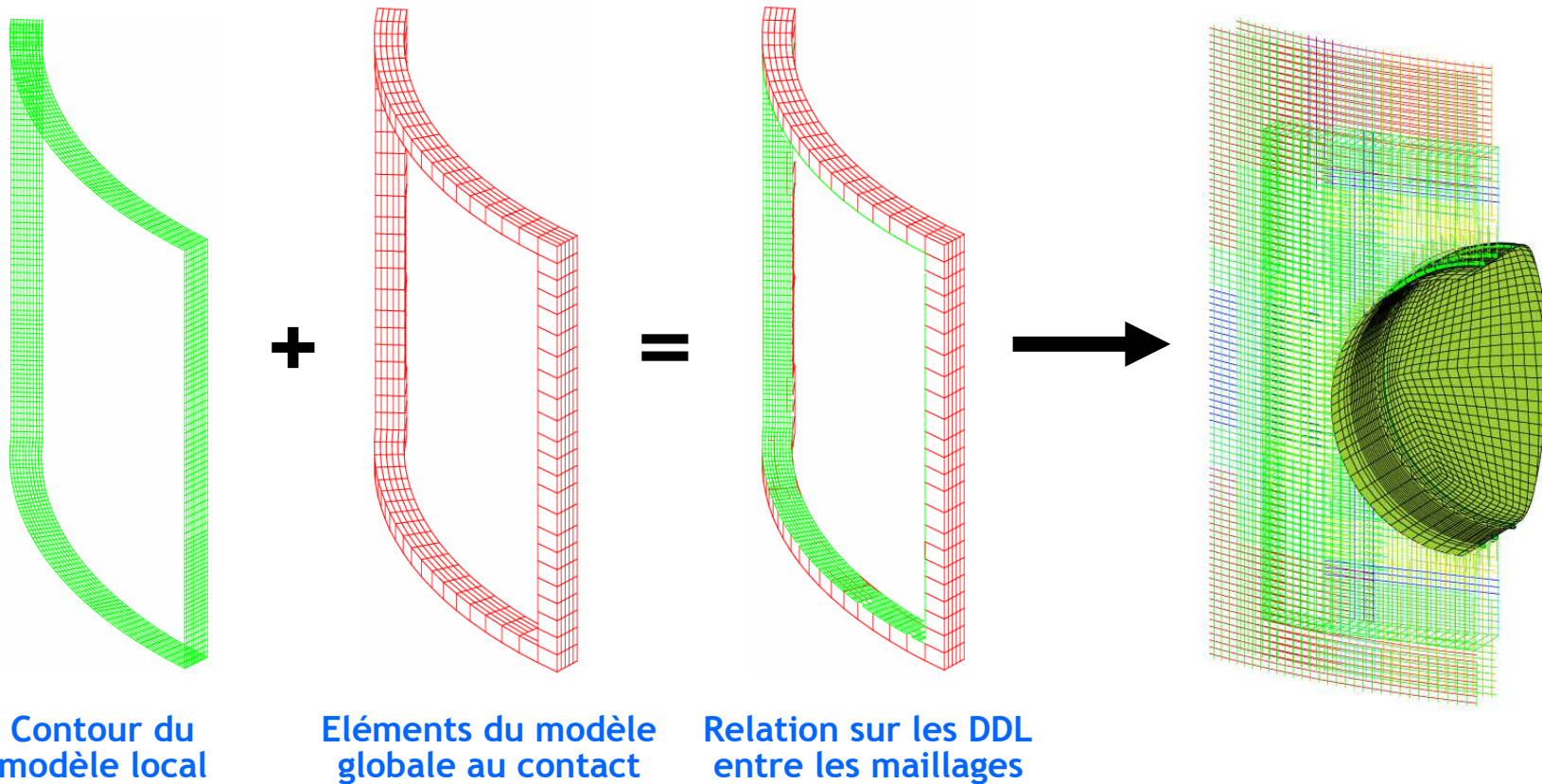
Présentation de la géométrie et du maillage

- **Modèle local du tampon contenant l'ensemble des nappes de fers présentes dans les plans.**



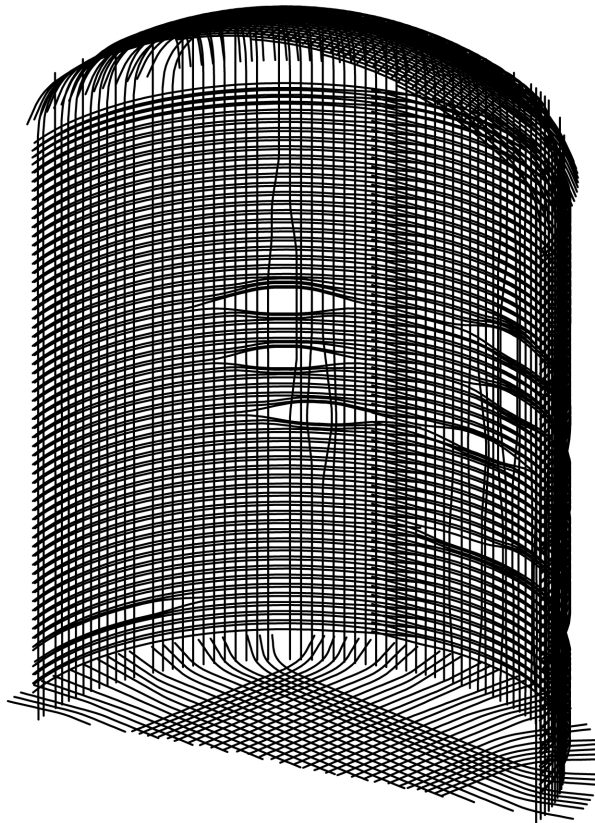
Présentation de la géométrie et du maillage

- Le modèle local est accroché par relations sur les DDL au reste de la structure.

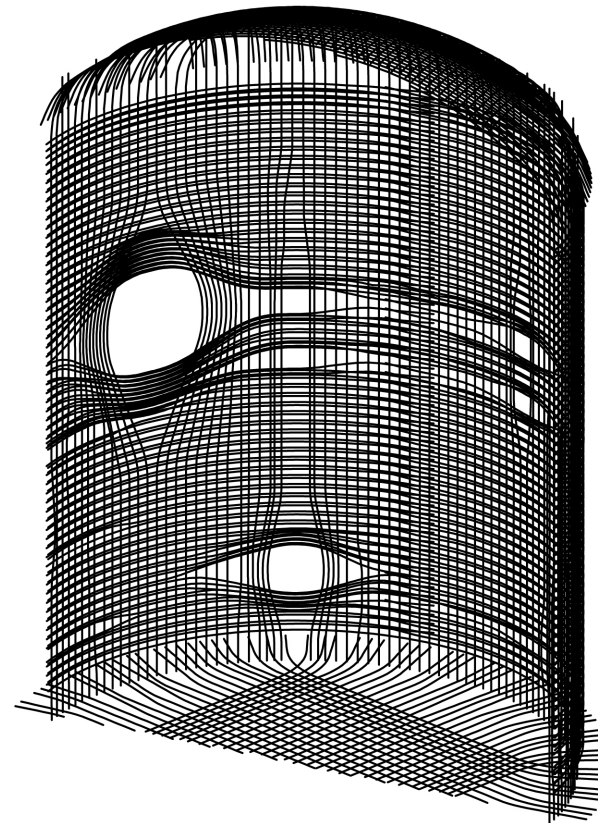


Présentation de la géométrie et du maillage

- Précontrainte de toute l'enceinte avec toutes les déviations du fût.
- 355 câbles situés dans le radier, le fût (verticaux et horizontaux) et le dôme.



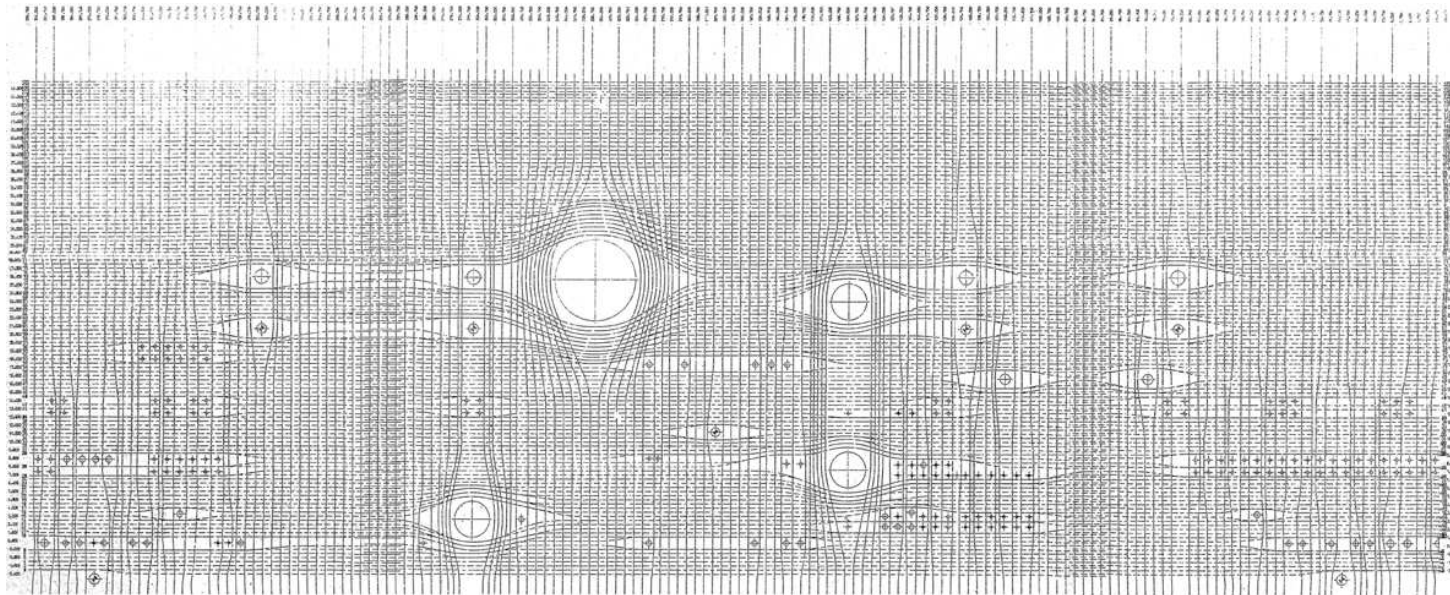
Précontrainte de l'ensemble du BR : vue sur nervure 1



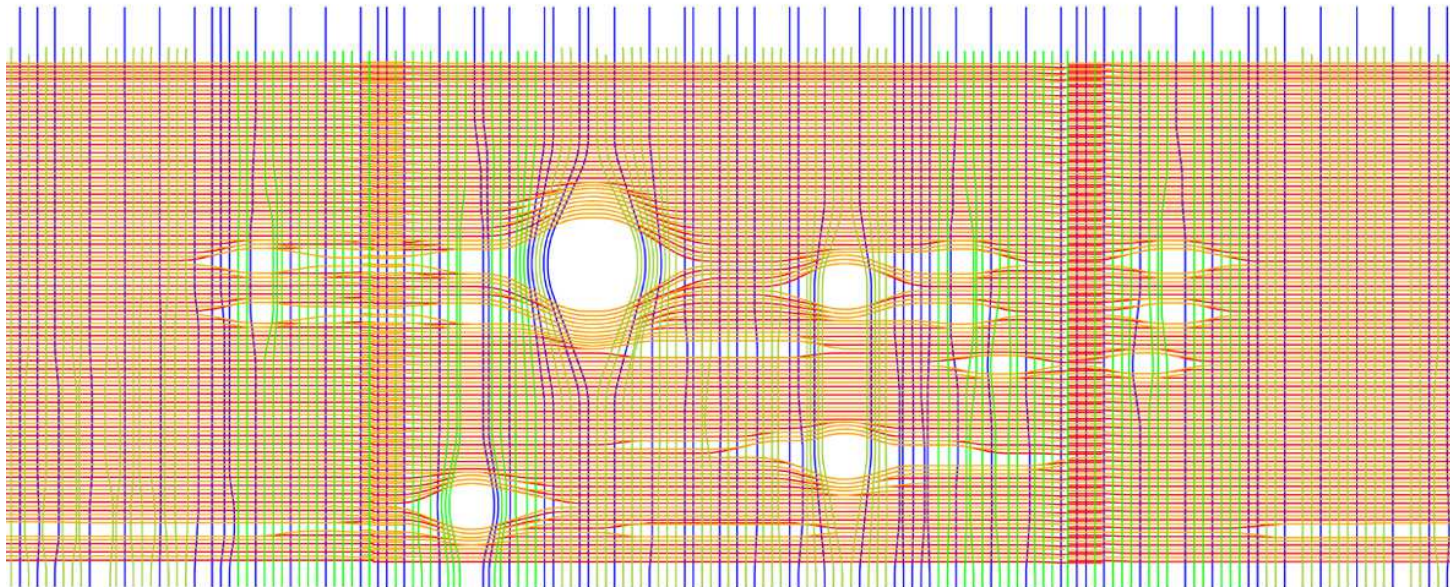
Précontrainte de l'ensemble du BR : vue sur nervure 2

Présentation de la géométrie et du maillage

Plans



Réalisé



Calcul thermique au jeune âge

- Calcul de la chaleur dégagée lors de la réaction d'hydratation du béton pendant sa mise en œuvre.
- Le but est de disposer d'un moyen pour évaluer le risque d'apparition de la réaction sulfatique interne d'une part et la fissuration induite par effet thermique d'autre part.
- Utilisation de la méthode d'évaluation du degré d'hydratation développée au LMT de Cachan.

Calcul thermique au jeune âge

Utilisation de la méthode d'évaluation du degré d'hydratation développée au LMT de Cachan.

$$\dot{\xi} = f(\xi) \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$$

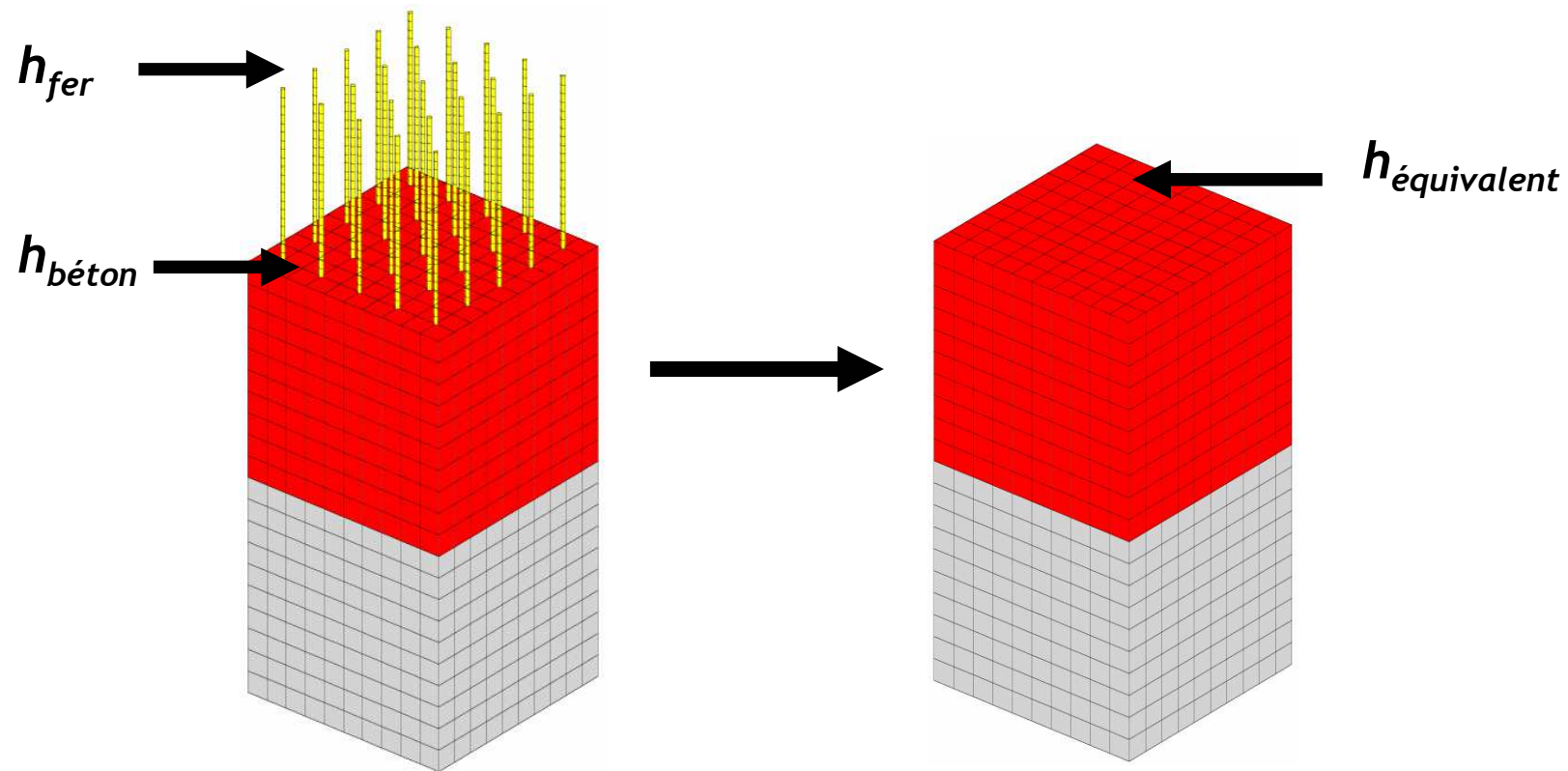
$$\dot{Q} = L \dot{\xi}$$

- Equation d'évolution du degré d'hydratation.
- Terme source de l'échauffement obtenu à partir du degré d'hydratation.

- Prise en compte des conditions limites de convection avec effet des fers en attente.
- Une procédure CAST3M est développée pour réaliser ces calculs.
 - Prise en compte du phasage.
 - Possibilité d'ajouter des éléments annexes et des pièces de béton déjà solide.

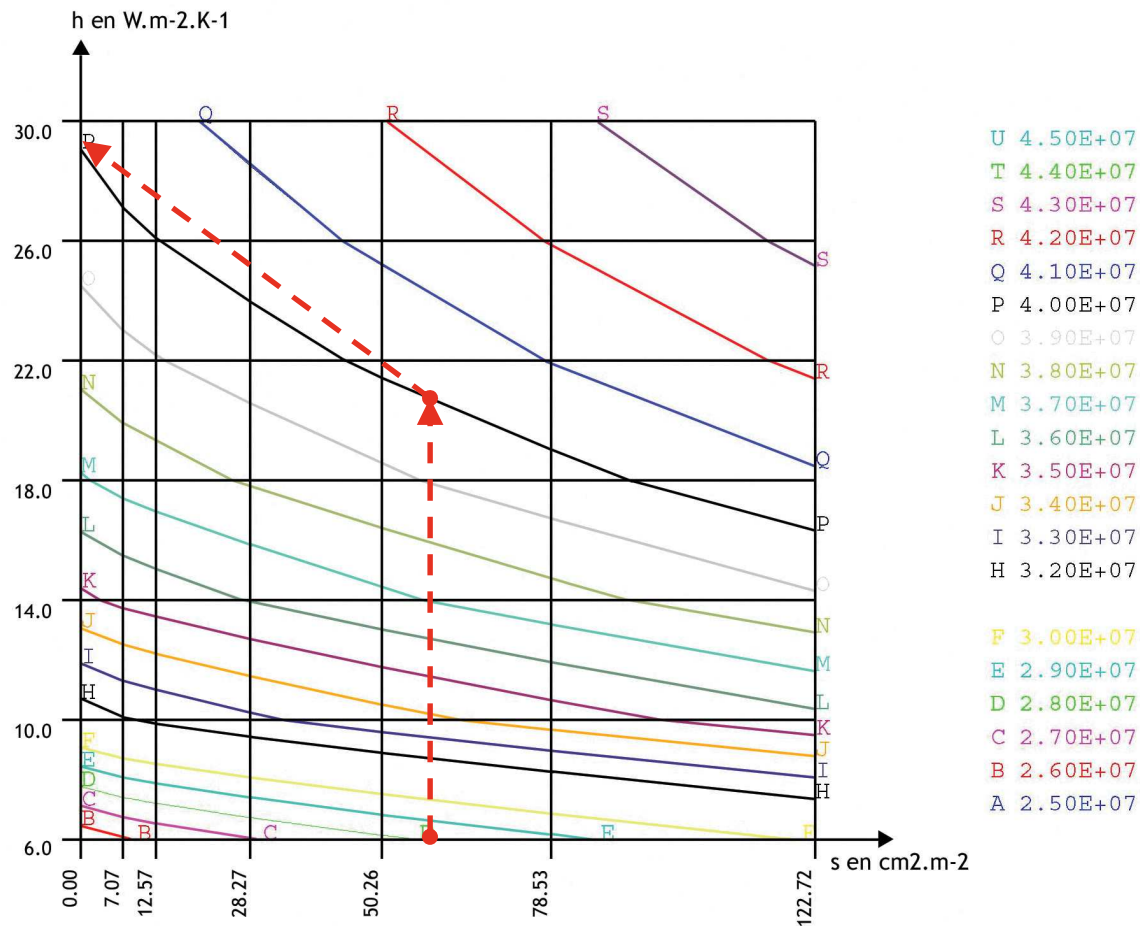
Calcul thermique au jeune âge

- Des essais numériques sont réalisés dans CAST3M sur une éprouvette. Pour une section de fer et une valeur de h , on détermine la valeur de h équivalente dissipant la même quantité d'énergie sans modélisation des fers en attente.



Calcul thermique au jeune âge

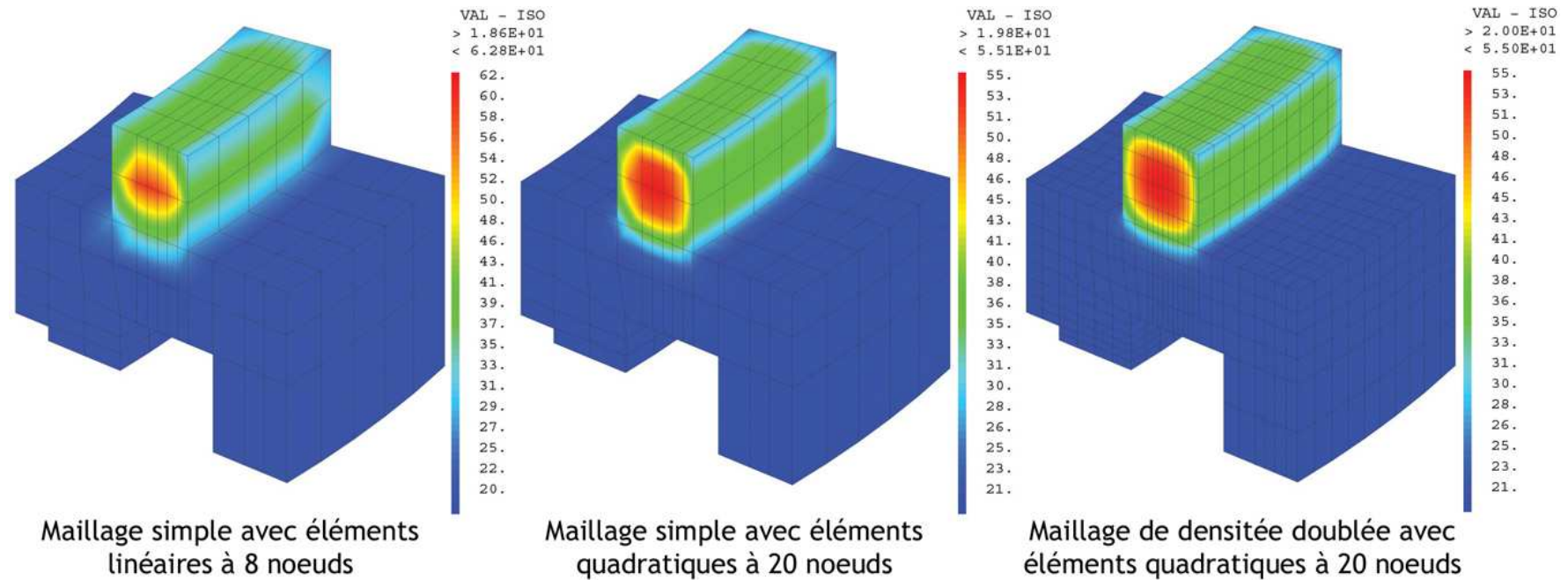
- Création d'une abaque iso-énergie permettant de prendre en compte l'effet des fers en attente.



- Pour une valeur du couple h et s (section de fer/m²)
- On remonte la courbe iso-énergie jusqu'à l'abscisse s = 0 cm²/m² pour obtenir le h équivalent.

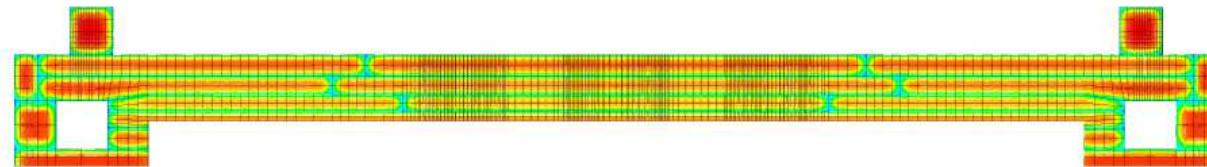
Calcul thermique au jeune âge

- Évaluation de la température à cœur du béton : Influence du type d'élément finit utilisé, linéaire ou quadratique.

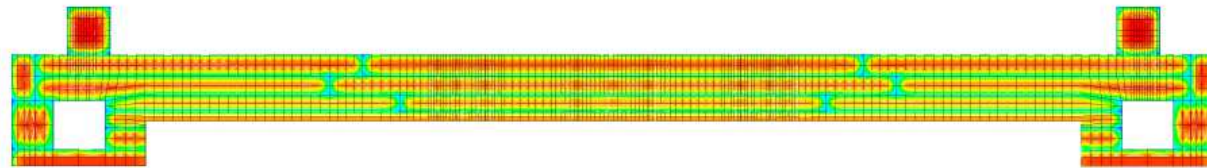


Calcul thermique au jeune âge

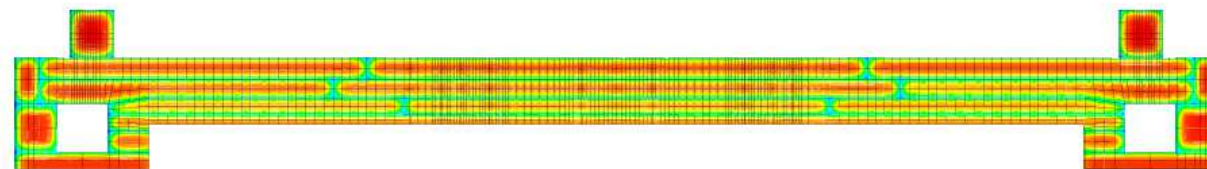
- Les études sont menées dans le radier avec la loi d'hydratation du béton de Civaux.
- Les résultats de calcul donnent des températures maximales atteintes à cœur du béton.



CHAMP DE TEM MAXIMAL DANS LE BETON A 50 GON



CHAMP DE TEM MAXIMAL DANS LE BETON A 100 GON



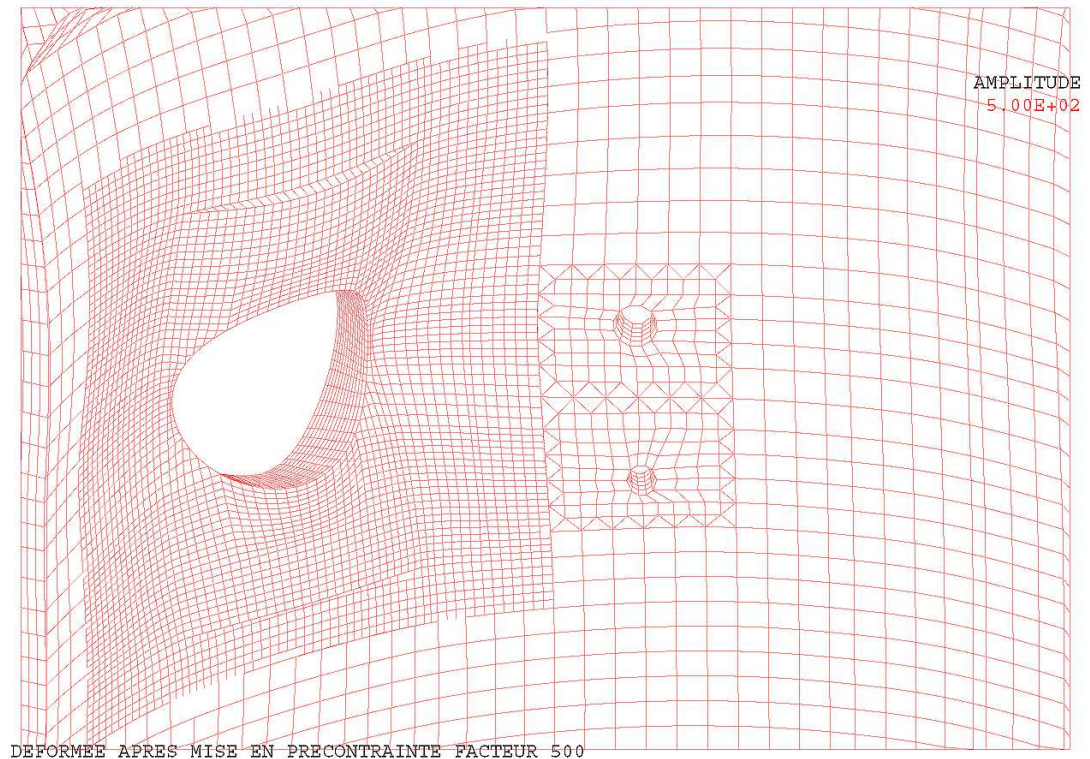
CHAMP DE TEM MAXIMAL DANS LE BETON A 0 GON

Le chargement de la précontrainte

- Des éléments de maillages complémentaires sont introduits pour recréer la rigidité du sol, de l'enceinte externe et des structures internes.
- Le chargement de la précontrainte est effectué avec la procédure « PHASAGE ».
- La mise en tension est réalisée en 16 étapes identifiées d'après le planning de Cattenom 2.
- Les données numériques pour le calcul des pertes dans les câbles et les forces sont issues de la carte d'identité de l'enceinte Cattenom 2.

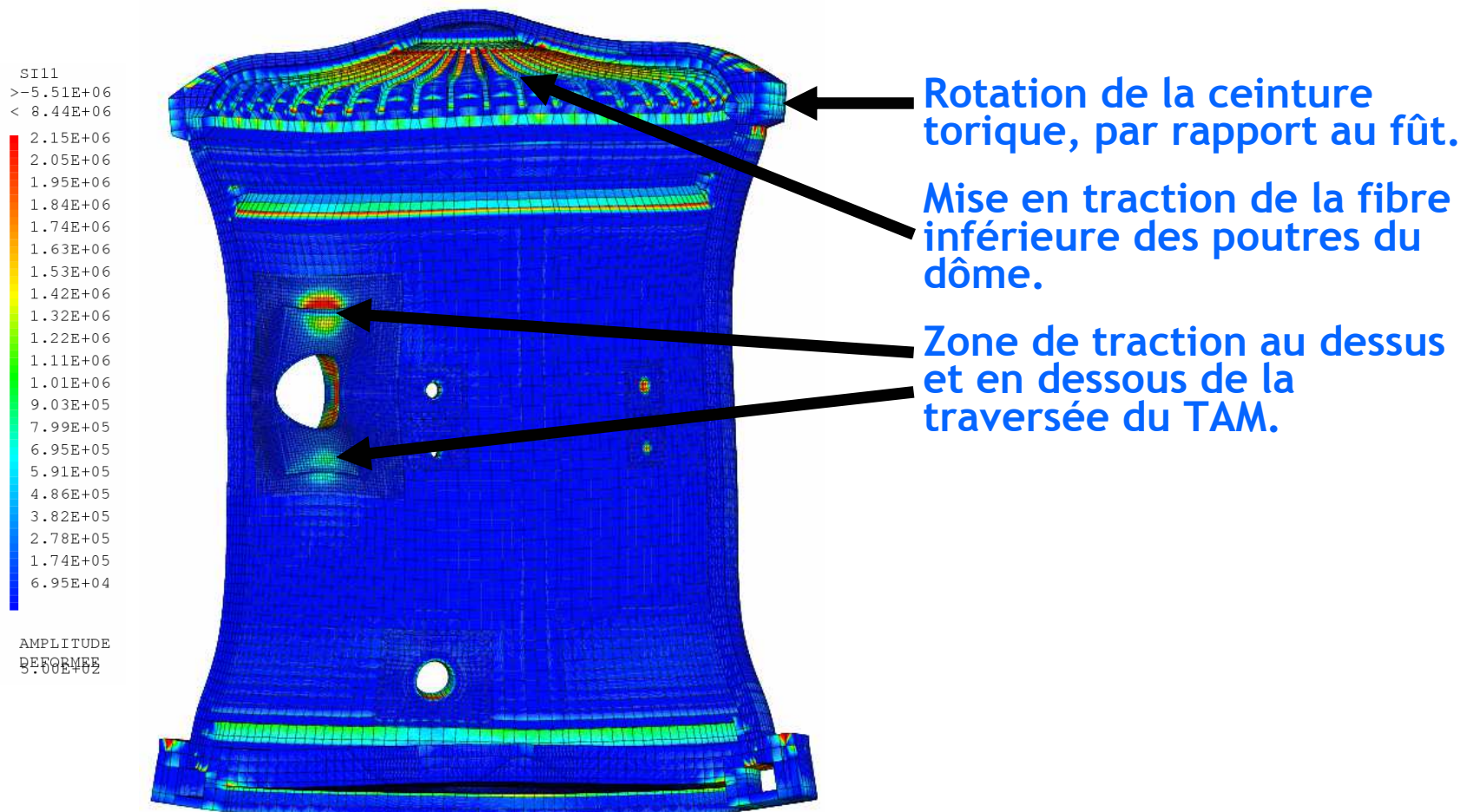
Le chargement de la précontrainte

- Déformations à l'issue d'un calcul élastique où la précontrainte est appliquée en une seule phase.



Le chargement de la précontrainte

- Déformations à l'issue d'un calcul élastique où la précontrainte est appliquée en une seule phase.
- Ce calcul permet d'appréhender le comportement général du modèle sous chargement de la précontrainte.



Évaluation du comportement différé de l'enceinte

- Les déformations différées sont calculées à chaque étapes de la construction.
 - La procédure PHASAGE utilise les formules du BPEL 1999 pour déterminer le retrait à l'issue de chaque phase de la construction et le fluage à l'issue de chaque étape de la mise en précontrainte.
 - Un calcul sur la vie de l'ouvrage permet d'estimer les pertes de précontraintes à 20 ans, 40 ans puis à 60 ans.
- Les déformations différées calculées à 20 ans seront comparées aux mesures effectuées sur site.

Application du chargement à pression ultime

- **Après le calcul des déformations différées un chargement en pression est appliqué.**
 - Ce chargement correspond à une montée de pression quasi-statique dans l'enceinte. Ce scénario correspond au cas d'une montée rapide en pression avant que la température n'ait le temps de se propager dans la structure.
 - Les résultats du calcul à pression de dimensionnement sont comparés aux mesures effectuées lors de l'épreuve décennale.
 - La pression est appliquée jusqu'à rupture de l'enceinte (pression ultime).
 - Ce scénario sert à estimer le comportement de l'enceinte en situation accidentelle à la fin de la vie de l'ouvrage.

CONCLUSION

- Une étude qui appréhende toutes les étapes de la vie de l'enceinte, de la construction jusqu'à la fin de l'exploitation.
- Des nouveautés sont introduites telle que la démarche multi-échelle intégrée.
- Plusieurs procédures sont déjà développées pour faciliter le maillage, le calcul de l'historique de l'échauffement du béton ...
- Les calculs de pression sont actuellement en cours.

CONCLUSION

- Une expérience très enrichissante qui m'a conduit à mettre en œuvre les connaissances acquises dans le cadre de ma formation à l'ESTP en Génie Civil Nucléaire.
- C'est un stage très valorisant car je pense que mon travail va contribuer à faire progresser la sûreté des réacteurs nucléaires.
- J'ai eu beaucoup de plaisir à travailler avec le logiciel CAST3M et en particulier la possibilité s'adapter aux besoins en créant des procédures utilisateurs.
- Mille mercis à toute l'équipe du bureau de Génie civil de l'IRSN, de l'équipe de l'ENS Cachan et de l'équipe de développement du logiciel CAST3M du CEA Saclay qui m'ont apporté leur aide et leur expérience pour mener à bien mon stage.

Merci de votre attention