



## **Présentation de l'atelier modélisation numérique THM du projet National CEOS**

Alain Sellier

### **► To cite this version:**

Alain Sellier. Présentation de l'atelier modélisation numérique THM du projet National CEOS. CFM 2009 - 19ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2009, Marseille, France. <hal-03390732>

**HAL Id: hal-03390732**

**<https://hal.science/hal-03390732v1>**

Submitted on 21 Oct 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

# Présentation de l'atelier modélisation numérique THM du projet National CEOS.FR

A. SELLIER

Université de Toulouse, Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions, LMDC UPS / INSA, 135 avenue de Rangueil, 31077 Toulouse cedex

## Résumé :

*Le projet national CEOS.fr (Comportement et Evaluation des Ouvrages Spéciaux. fissuration retrait) a pour but d'améliorer la maîtrise de la fissuration des éléments en béton armé. Il aborde le problème sous plusieurs angles (modélisation, expérimentation, ingénierie) et considère les sollicitations via la classification suivante : chargement monotone, chargement THM (Thermo Hydro Mécanique) et chargement cyclique. L'atelier « modélisation numérique THM » a pour objectif d'évaluer la capacité des équipes de recherche françaises impliquées à modéliser les effets mécaniques de trois types de sollicitation THM. Il s'agit ici de présenter les cas d'étude soumis à ces équipes.*

## Abstract :

*CEOS.fr (meaning: Behaviour and Assessment of Specific Buildings. Cracking and Shrinkage) is a French Civil Engineering national research project dealing with the problem of cracking assessment in massive reinforced concrete structures. The problem is approached with three complementary points of view (modelling, experimentation and engineering conception rules). In this project a classification has also been adopted in terms of loading types: constant loading, cyclic loading and thermo hydro-mechanical loading (THM). The "THM modelling" workshop is at the overlap between the modelling project and the THM loading type. Its goal is to supply benchmarks to evaluate French researchers teams dealing with this topic. The paper presents the three benchmarks proposed in the framework of this workshop.*

**Mots clefs:** béton, THM, modélisation, benchmark.

## 1 Introduction

Le projet national CEOS.fr (Comportement et Evaluation des Ouvrages Spéciaux. Fissuration Retrait) a pour but d'améliorer la maîtrise de la fissuration des éléments en béton armé. Il aborde le problème sous plusieurs angles (modélisation, expérimentation, ingénierie) et considère les sollicitations via la classification suivante : chargement monotone, chargement THM (Thermo Hydro Mécanique) et chargement cyclique. Le projet est par ailleurs organisé chronologiquement en deux tranches, la première (2007-2008) a pour but de faire l'état de l'art dans le domaine, la seconde (2009-2011) de proposer des solutions aux problèmes identifiés. L'atelier « modélisation numérique THM » a, dans la première tranche du projet, pour objectif d'évaluer la capacité des équipes de recherche impliquées à modéliser les effets mécaniques de trois types de sollicitation THM. Pour cela trois essais complémentaires sont proposés à la modélisation aux différentes équipes. Chacun des trois essais s'intéresse à un contexte THM caractérisé par un chargement dominant (jeune âge, hydrique ou thermique). Le premier concerne le risque de fissuration au jeune âge due aux gradients thermomécaniques associés à l'hydratation dans un voile en béton de 1,20 m d'épaisseur situé à l'extérieur, il s'agit du voile expérimental EDF de la centrale nucléaire de Civaux. Le second s'intéresse aux déformations à long terme en contexte hydrique variable (chargement hydrique dominant) et température modérée constante (38°C), il s'agit de deux poutres en béton (l'une est armée, l'autre est non armée) suivies pendant plus d'un an au LCPC. Le troisième concerne un chargement thermique dominant (jusqu'à 200°C) appliqué à une structure massive axisymétrique en béton armé (Maqbeth), l'essai a été réalisé au CEA. Après avoir présenté les essais, quelques résultats de la modélisation seront discutés ce qui permettra de mieux cerner les limites des modèles THM actuels et par voie de conséquence de dégager quelques perspectives de recherche.

## 2 Présentation des cas test

Pour tous les cas test présentés ci-dessous sont demandés aux équipes participantes deux types de résultats : Le premier type concerne le modèle utilisé il comprend les équations constitutives fondamentales (THM), les lois d'évolution des paramètres matériaux (visualisation du calage sur essais mécaniques jeune âge isotherme, courbes de retrait, fluage s'il y a lieu, chaleur adiabatique), le maillage, l'histoire des conditions aux limites (traitement du phasage des travaux). Le second type de résultats est celui associé à chaque cas test, il est brièvement décrit ci-dessous.

### 2.1 1<sup>er</sup> cas test : Jeune âge - Hydratation du voile expérimental EDF de Civaux

La problématique est celle de l'évaluation du risque de fissuration au jeune âge d'ouvrages massifs sous l'effet de la chaleur libérée par les réactions chimiques d'hydratation du ciment. Le cas d'étude sélectionné présente les avantages suivants : géométrie simple mais suffisamment massive pour être représentative d'un ouvrage de génie civil réel, ferrailage important, phasage réaliste de mise en œuvre (fondation, 1<sup>ère</sup> levée, 2<sup>ème</sup> levée...), résultats disponibles assez nombreux (suivi des températures, plans de fissuration...). Il s'agit de deux voiles en béton armé situés sur le site de la centrale de Civaux, l'un en béton ordinaire (BO), et l'autre en béton à haute performance (BHP) [3][4][5]. Ces voiles ont été instrumentés par EDF avec des thermocouples afin de suivre l'évolution des températures suite à la thermo-hydratation du béton et d'en observer les conséquences en terme de fissuration. Les deux voiles ont une épaisseur d'1.20 m. La longueur de chacun d'eux est de 20 m. Une reprise de bétonnage a été réalisée ; la hauteur de la première levée est de 1,90 m ; la hauteur de la 2<sup>ème</sup> levée est de 0,90 m. Le ferrailage est constitué de deux treillis reliés entre eux par des épingles (FIG. 1).

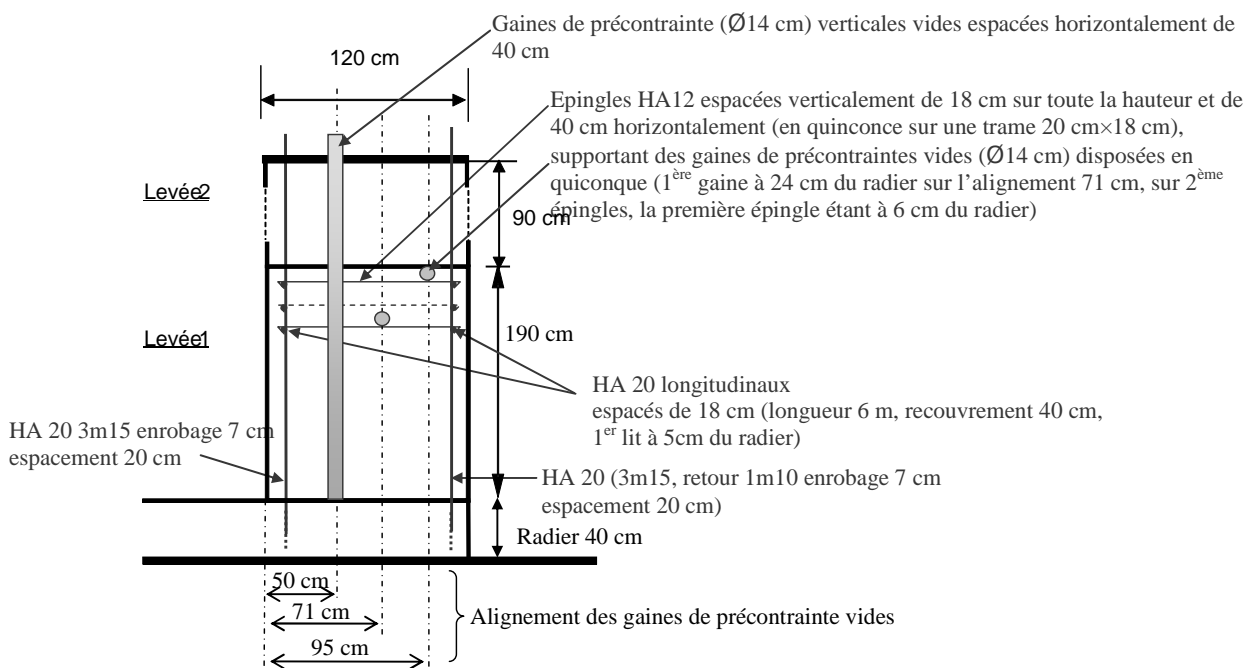


FIG. 1. - Ferrailage du voile V1 de Civaux

Les données sont la température du béton frais. La température initiale du radier sur lequel est coulé le voile. La température extérieure qui a été mesurée pendant les essais. La chaleur d'hydratation qui doit être déduite de résultats d'essais quasi-adiabatique de type Langavant (350g de ciment, 175 g d'eau, 1100 g de sable normalisé), le retrait endogène des bétons et les caractéristiques mécaniques des matériaux. Il s'agit alors de voir si les modèles des différents laboratoires sont susceptibles de prédire l'histoire thermique du voile d'une part et d'autre part le faciès de fissuration tel qu'il a été relevé par EDF (cf. figures 2 et 3).

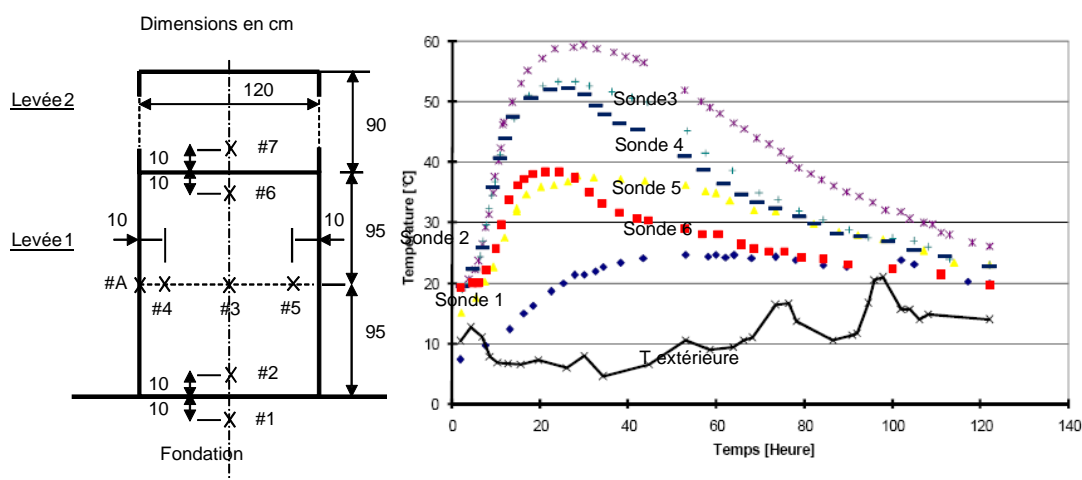


FIG. 2. - Position des sondes de température et évolution des températures pendant 120 heures à partir du coulage du béton.(illustration des températures dans le cas du Béton ordinaire )

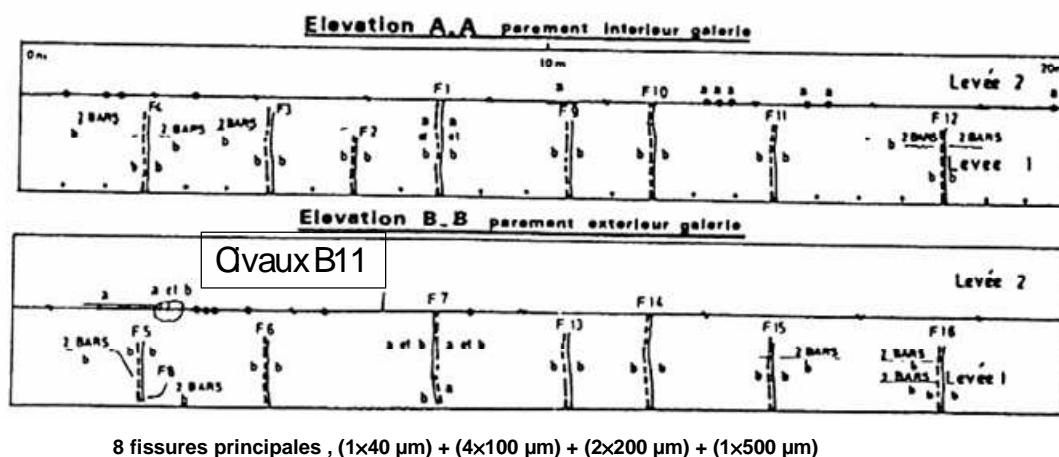


FIG. 3. – Exemple de facies de fissuration relevé par EDF sur les voiles expérimentaux de la centrale de Civaux (cas du béton ordinaire)

Trois laboratoires sont représentés pour répondre à ce cas test : le LCPC, le LMT de l'ENS de Cachan, et le LMDC de l'université de Toulouse. L'analyse comparative des résultats est en cours, il semble toutefois que les participants aient des modèles adéquats pour prédire les champs de température, par contre la prédiction du risque de fissuration est sous estimée par les différentes équipes. Les perspectives de recherches révélées par ce cas test concerne d'un part l'amélioration des procédures expérimentales pour la mesure des caractéristiques physiques au jeune âge (retrait endogène, définition de la température de référence...) et d'autre part l'amélioration des modèles pour la simulation de la fissuration (localisation des fissures, problème de l'ancrage des aciers au jeune âge...).

## 2.2 2<sup>ème</sup> cas test : Retrait - Déformations des poutres LCPC

Ce cas test concerne la prédiction des risques de fissuration par retrait de dessiccation. Il s'agit ici de tester la

capacité des modèles à reproduire l'amplitude des variations dimensionnelles liées aux transferts hydriques. Pour cela des poutres étudiées au LCPC [7][8] ont été sélectionnées ; elles sont soumises à une histoire hydrique variable. Elles sont constituées d'un béton ordinaire dont les caractéristiques mécaniques et le comportement hydro-mécanique peuvent être déterminés à partir de résultats d'essais sur éprouvettes. Les poutres ont été maintenues dans une salle climatisée (HR 30%, 38°C, figure ci-dessous) et ont fait l'objet d'un suivi hydrique particulièrement précis (suivi de masse et de profils hydriques), les mesures des déformations et des déplacements ont également été effectuées [7][8]. Deux poutres sont considérées, leurs géométries externes sont identiques : 0,25 m de large, 0,50 m de haut et 3 m de long, 2,80m entre appuis. Par contre l'une est armée (P6) et l'autre non armée (P3). Les appuis, simples, sont situés à mi hauteur des poutres.

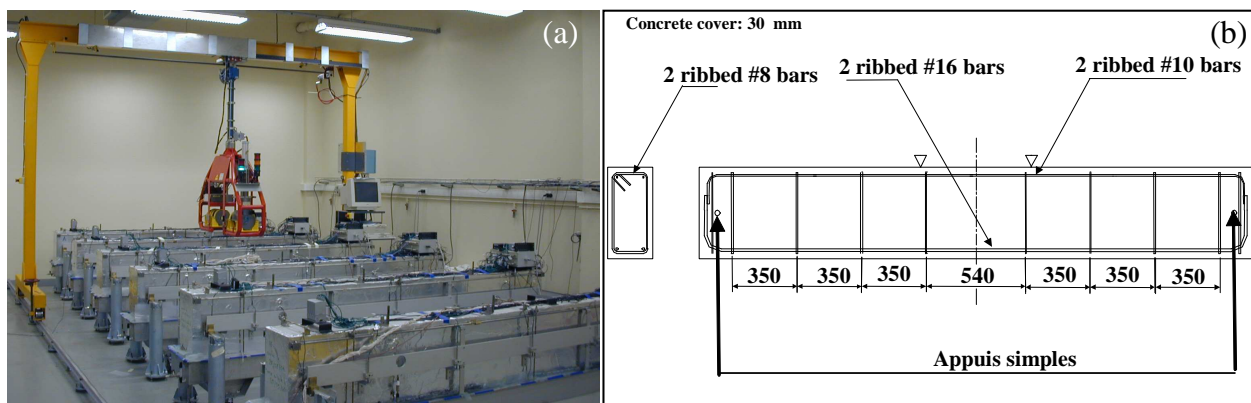


FIG. 4. – (a) Poutres LCPC en salle climatisée (HR 30%, 38°C), système de pesée et gamma-densimètre (b)

Ces poutres ont été soumises à des conditions aux limites hydriques conduisant en un premier temps à un séchage par la face supérieure et en un second temps à un remouillage de cette face. La face inférieure a quand à elle été constamment maintenue immergée (FIG. 5).

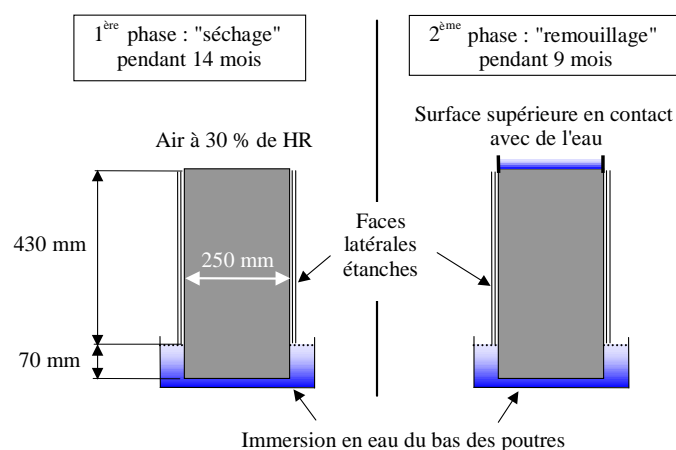


FIG. 5. - Histoire hydrique des poutres LCPC

Le béton constitutif des poutres a été caractérisé sur des éprouvettes soumises à diverses conditions hydro-mécaniques (retrait, fluage endogène, pertes de masse), le tout à 38°C, en condition de séchage (30% HR) analogue à la condition de conservation des poutres, ou en condition endogène également à 38°C (protection par feuilles d'aluminium adhésives). On demande aux équipes participantes de caler leur modèle sur les éprouvettes et de modéliser les deux types de poutre : sont demandés en particulier la variation de masse des

poutres en fonction du temps, la flèche et les élongations en différents points en fonction du temps, la teneur en eau sur une section droite en fonction du temps, les champs de contraintes et de déformation longitudinales dans le béton, la contrainte dans les aciers inférieurs et supérieurs pour la poutre P6 (à mi portée, et en fonction du temps), enfin la fissuration s'il y a lieu.

Les laboratoires participants à ce cas test sont : le LMT de l'ENS de Cachan, Le LECBA du CEA, le CSTB de Marne la Vallée, EDF-CIH et le LMDC de l'université de Toulouse. Là aussi l'analyse des résultats est en cours. On peut d'ores et déjà dire que la plupart des équipes sont capables de prédire la prise de masse d'eau et la première partie de l'histoire hydrique avec une précision acceptable. Par contre la simulation de la seconde phase hydrique semble poser quelques problèmes ; les modèles utilisés paraissent sous estimer la cinétique de reprise d'eau assez systématiquement. Concernant les champs de contrainte et d'endommagement, là aussi les résultats diffèrent quelques peu. Les modèles incluant le fluage semblent fournir de meilleurs résultats que ceux ne contenant qu'un module THM couplé à de l'endommagement. A l'issue de ce cas test deux voies de recherche émergent : le couplage THM-fluage-endommagement d'une part, l'amélioration de la simulation des échanges hydriques en contexte cyclique d'autre part. Du point de vue expérimental il serait nécessaire de disposer d'informations complémentaires concernant les échanges hydriques en température (isothermes et perméabilité du béton en contexte hydrique cyclique).

### 2.3 3<sup>ème</sup> cas test : Température - Maquette MAQBETH du CEA

Il s'agit du cas test à chargement thermique dominant, il permet de tester l'aptitude des modèles THM à rendre compte des effets mécaniques du couplage thermo-hydrique à température élevée (jusqu'à 200°C) et des forts gradients de température. Le test sélectionné conduit à une fissuration importante d'un ouvrage armé. Il s'agit d'un cylindre creux en béton armé étudié au CEA [9], de 3 mètres de haut, d'un diamètre extérieur de 2,2 mètres, avec des parois de 60 cm d'épaisseur. Cette géométrie permet de disposer d'une épaisseur suffisante pour obtenir un gradient de température élevé, de s'affranchir des effets d'échelle et d'être représentatif d'une structure de génie civil de grande taille. Elle permet aussi de disposer de symétries multiples pour permettre la mise en place de nombreux capteurs, d'obtenir des flux d'humidité et de chaleur unidimensionnels, d'obtenir dans la partie centrale (suivant la hauteur) une zone indépendante des conditions aux extrémités (aussi bien au niveau thermique qu'hydrique et mécanique), permettant ainsi de concentrer l'instrumentation dans une zone de comportement quasi-homogène.

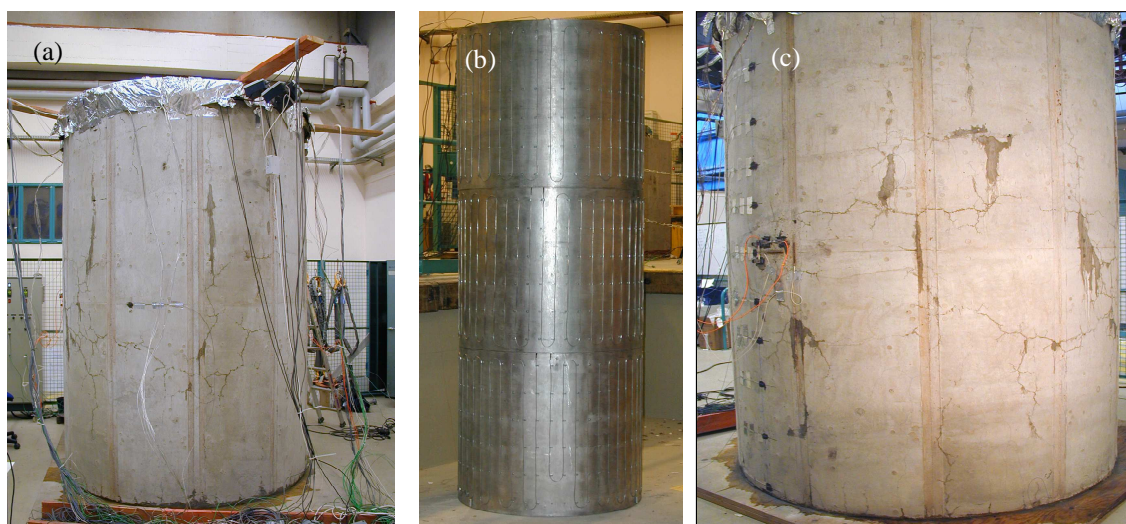
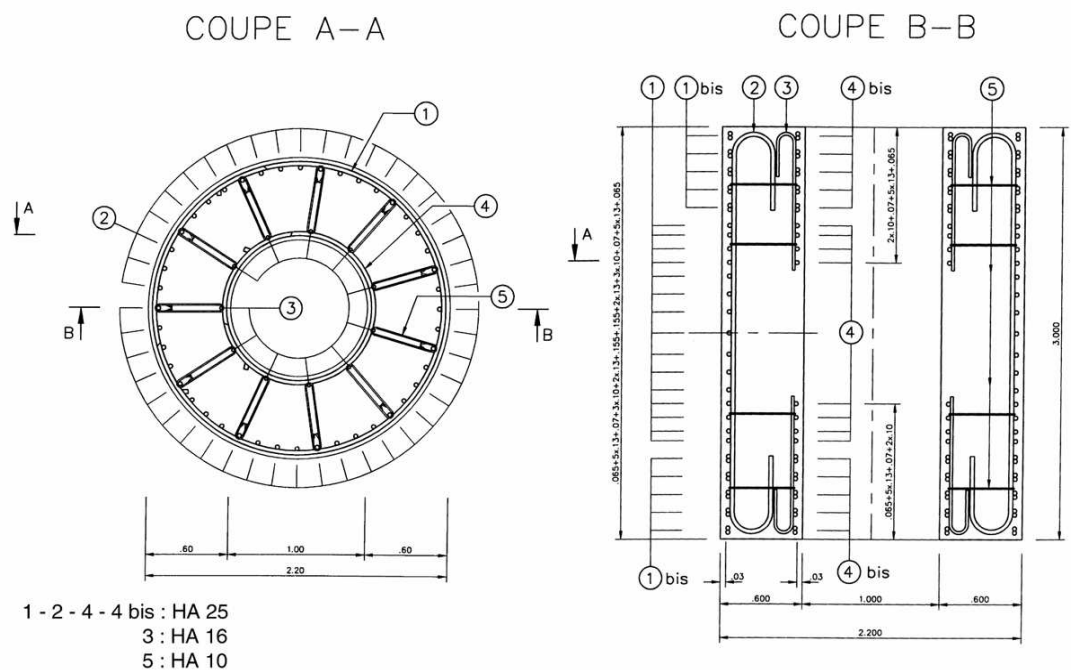


FIG.6. – (a) Vue générale de la maquette MAQBETH (b) mandrin chauffant (c) facies de fissuration et exsudation d'eau en fin d'essai

Le ferrailage représente près de 10% de la masse de la structure (2,2 tonnes). Il est constitué d'une cage d'armatures d'acier à haute adhérence (type CRELOI 500S), de diamètre 25 mm, illustrée ci-dessous.





**Figure 2-7 : Ferrailage cylindrique et coffrage de la maquette**

Le cylindre a été simplement posé sur le sol, isolé thermiquement par des planches de bois de 60 mm d'épaisseur et une couche de laine de roche de 20 cm d'épaisseur en partie supérieure. La géométrie cylindrique a également permis la mise en place d'un système de chauffage relativement simple, constitué par l'empilement de trois mandrins chauffants creux d'environ 10 kW de puissance chacun, d'un diamètre extérieur légèrement inférieur (0,98 m) à celui de l'intérieur de la maquette (1 m). Un espace annulaire entre les mandrins et le béton a ainsi été conservé afin de permettre la manutention des éléments et ne pas gêner l'instrumentation en face chaude. Le mandrin chauffant est isolé thermiquement du sol par une couche de 30 mm d'isolant réfractaire. Le cycle thermique imposé à la paroi interne de la maquette peut être schématisé en quatre phases : une première montée en température de 20 à 150°C (durée 22 heures), une décroissance non contrôlée de la température de 150 à 75°C (durée 10 heures), une phase de montée en température de 75 à 200°C (durée 21 heures), un palier à 200°C (durée 2 mois environ). Le travail demandé aux différentes équipes consiste à simuler les profils de température à différentes échéances, les profils de teneurs en eau, d'humidité relative et pression interstitielles, les profils de déformations mécaniques en fonction du temps, les contraintes dans les aciers horizontaux et verticaux à mi hauteur en fonction du temps ainsi qu'à fournir les informations relatives à la fissuration (carte de fissuration et ouverture des fissures).

Seules deux équipes ont été en mesure de simuler ce cas test : le CSTB de Marne la Vallée et le LECBA du CEA. Les deux équipes ont utilisées pour l'une un modèle multiphasique complet pour l'autre un modèle simplifié. Les deux ont été capables de prédire convenablement les champs de température et de déformation. Par contre les facies de fissuration ne sont pas toujours très réalistes, laissant supposer que les recherches concernant les couplages entre les modèles THM utilisés pour estimer les champs de pression intra-poreuse et les modèles d'endommagement utilisés doivent être poursuivies.

## Conclusion

Les trois cas tests proposés aux participants du benchmark CEOS.fr recouvrent trois grandes classes de chargement THM dominants : jeune âge, hydrique ou thermique. Le voile de Civaux s'intéresse aux effets de la chaleur d'hydratation et à son couplage avec le comportement mécanique au jeune âge ; même si les modèles permettent d'estimer correctement les températures, l'estimation des facies de fissuration nécessite des investigations complémentaires (meilleure estimation des retraits au très jeune âge, amélioration

des modèles). Les poutres LCPC montrent quant à elles que si les modèles actuels permettent de simuler correctement le comportement hydromécanique non saturé en phase monotone, ils ne sont plus aussi performants en phase cyclique ; cette dernière est pourtant la condition la plus courante sur les ouvrages de génie civil. L'amélioration de cet aspect passe par une phase expérimentale concernant la mesure du transfert hydrique en phase cyclique et ses conséquences sur le comportement mécanique (retrait, fluage notamment). Le dernier cas test révèle les difficultés liées à la modélisation d'un milieu fissuré non saturé à haute température ; ce dernier fait appel non seulement une vaste connaissance des changements de phase possibles dans le béton en température mais aussi à la modélisation des risques de fissuration particuliers rencontrés dans de telles conditions (forte pression intra-poreuse, hétérogénéité des dilations thermiques...). Finalement, ce benchmark aura permis de faire le point sur l'état des connaissances dans le domaine, il aura également permis de proposer quelques pistes pour améliorer la prédiction du risque de fissuration du béton en contexte THM. Ces pistes devraient être suivies par les partenaires CEOS.fr lors de la deuxième tranche du projet (2009-2011), ainsi que dans le projet ANR « MEFISTO » [10], une émanation de CEOS.fr permettant justement de soutenir, durant la seconde tranche du PN, le traitement des axes de recherche révélés par la 1<sup>ère</sup> tranche du projet CEOS.fr. Enfin, précisons que les deux autres axes de recherche du PN (l'expérimentation structurelle et la réglementation) travaillent en concertation avec l'axe modélisation pour proposer à l'issue de CEOS.fr non seulement une amélioration des approches numériques, mais aussi des bases de données expérimentales permettant de proposer de nouvelles approches réglementaires pour le dimensionnement industriel des structures massives en béton.

## Références

- [1] Lien site internet projet national CEOS-FR : <http://www.ceosfr.org/>
- [2] Sellier A., Benchmark CEOS.fr « Comportement sous chargement thermo-hydrique »,
- [3] Granger L. (1996), Comportement différé du béton dans les enceintes de centrales nucléaires. Analyse et modélisation, Thèse de doctorat de l'ENPC, avril 1996.
- [4] Ithuralde, G., 1989. La perméabilité vue par le maître d'ouvrage, Colloque Béton à hautes performances, Ecole Normale Supérieure, Cachan.
- [5] J. Nectoux, "Expérimentation d'un béton à haute performance destiné aux enceintes de réacteur nucléaire", Annales de l'ITBTP, N°502, 1992.
- [7] Multon S., Seignol J-F., Toutlemonde F., 2006, "Concrete beams submitted to various moisture environments", Structural Engineering and Mechanics, Vol. 22, n°1, pp. 71-83.
- [8] Multon S., Toutlemonde F., 2004, "Water distribution in concrete beams", Materials and Structures, Vol. 37, pp. 378-386.
- [9] G. Ranc, C. Gallé, J. Sercombe, M. Pin, S. Rodrigues and S. Durand , Rapport CEA SCCME 03-652-AG « Bilan synthétique des actions de R&D sur le comportement thermo-hydro-mécanique du béton réalisées au LECBA sur la période 1999-2003 », (2003).
- [10] Projet ANR Villes durables n° VD08\_323065 « MEFISTO » 2009-2011, pilote du projet : B.Capra.