

## Objectifs

De nombreuses constructions en béton doivent assurer des fonctions structurelles diverses, au-delà de leur simple résistance. Parmi ces fonctions, beaucoup sont liées à la fissuration du béton armé : celles ayant un rapport à la déformabilité, à l'étanchéité à l'air ou à l'eau, à la durabilité et parfois à la sûreté.

La prévision du comportement et de la fissuration des éléments en béton, béton armé et/ou précontraint est donc importante pour le bon fonctionnement et la durabilité des structures concernées. En fonction de la nocivité des phénomènes, cette prévision doit être faite vis-à-vis d'états limites, soit de service, soit ultimes.

La conception des structures en béton est aujourd'hui basée, selon l'Eurocode 2, sur une approche de type performantielle (durabilité et fonctionnalité aux états limites de service).

L'ouverture et l'espacement des fissures sont estimés via des formules qui apportent des solutions relativement satisfaisantes pour des poutres en flexion (validation expérimentale sur des structures élémentaires).

# Projet National CEOS.fr

## Comportement et Evaluation des Ouvrages Spéciaux ; fissuration, retrait

### ... suite Objectifs

L'expérience a montré qu'elles devaient être adaptées pour les voiles ainsi que pour d'autres éléments structuraux dont les pièces massives. De plus, l'humidité des pièces massives est souvent négligée dans les formulations des règles calibrées principalement pour les bâtiments (comportement au jeune âge, prise en compte des effets thermiques, comportement à long terme en intégrant le retrait et fluage).

On peut envisager, pour disposer de calculs plus réalistes au plan physique, de recourir à la modélisation numérique du comportement mécanique des structures en béton armé, en utilisant notamment des lois de comportement non linéaires pour la fissuration du béton et l'adhérence acier-béton. On se heurte alors à certaines limitations dès lors que l'on souhaite exploiter les résultats de façon locale, en termes d'espacement et d'ouverture de fissures.

**Ce constat des limites actuelles des outils de calcul à disposition de l'ingénierie pour déterminer un état représentatif de fissuration des structures en béton armé ou précontraint relativement épaisses, a motivé la profession à monter le Projet National CEOS.fr. Avec une implication de maîtres d'ouvrage, de gestionnaires d'ouvrage, de bureaux d'étude, de sociétés d'ingénierie spécialisée, d'instrumentistes et de chercheurs en modélisation numérique, le Projet National se donne les moyens de faire avancer la recherche en modélisation dans le but d'apporter des réponses et des outils pour la conception durable de structures de grandes tailles. Une grande campagne expérimentale est également lancée pour accompagner la démarche de réflexion.**



Centrale nucléaire de St-Laurent-des-Eaux  
© ASCO-TP/Daniel Vandros

## Programme réalisé

L'objectif du projet est de faire progresser les outils et les pratiques d'ingénierie en matière de prédiction du comportement ou de l'état d'endommagement des structures massives en béton, béton armé ou précontraint.

Au-delà d'une nécessaire amélioration de la connaissance du phénomène de fissuration du béton armé, il convient de capitaliser ce savoir et ce savoir-faire acquis à différents niveaux :

- **au niveau de la simulation numérique**, en développant des modèles non linéaires robustes capables de prédire l'apparition de l'endommagement et d'en post-traiter un état de fissuration,
- **au niveau calcul de structure**, en proposant un guide pour l'ingénierie afin de pouvoir réaliser et exploiter des calculs plus ou moins complexes de structures massives de la façon la plus fiable et pertinente possible,
- **au niveau réglementaire** en enrichissant, via des procédures relativement simples, les formules d'estimation des espacements et ouvertures des fissures aux ELS et ELU.

La philosophie du Projet National CEOS.fr est de fédérer les différents acteurs (chercheurs en modélisation numérique, gestionnaire d'ouvrages, instrumentistes, et ingénierie) autour d'ateliers où chacun va apporter son savoir-faire pour avancer sur la compréhension des phénomènes, leur modélisation et la conséquence sur les formules applicables par l'ingénierie.

Ainsi le programme a été divisé en tâches correspondant au type de chargement étudié :

- **Chargement statique monotone**
- **Chargement Thermo-Hydro-Mécanique (THM)**
- **Chargement cyclique.**

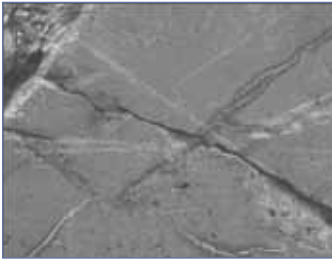
Au-delà de ces 3 thèmes, un découpage par actions et donc par objectifs a également été défini :

- **Axe Modélisation** : application et développement des modélisations les plus avancées,
- **Axe Expérimentation** : réalisation d'expérimentations (maquettes à l'échelle 1 et voiles à l'échelle 1/3) avec caractérisation fine des conditions aux limites et mesure du développement de fissures,
- **Axe Ingénierie** : définition à partir d'un dialogue calculs – essais, sur la base des corps d'épreuve testés dans le PN, puis à l'aide d'expérimentations numériques simplifiées, des préconisations à destination de l'ingénierie.

Pour tous les axes de travail, un échange permanent entre les acteurs impliqués sur chaque thème est maintenu autour des objectifs des axes.



Systeme paravalanche de Taconnaz.



Détail de fissures.



Essais CEOS.fr - Bloc prismatique en retrait gêné avant coulage.



Corps d'épreuve : Bloc prismatique en retrait gêné.

# 1

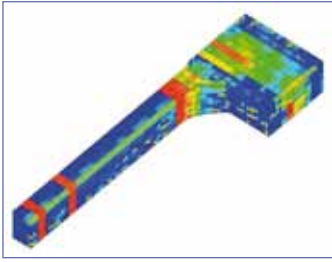
## Axe Modélisation : donner des outils numériques robustes

Les travaux réalisés ont permis dans la première tranche du PN de faire un bilan sur les modélisations existantes et leurs performances. Ce bilan a fait l'objet d'un premier benchmark interne à CEOS.fr et d'un workshop international qui a permis d'échanger avec la communauté internationale (ConCrack, 9-11 décembre 2009, Paris).

En parallèle un projet ANR (**MEFISTO**) a été lancé pour améliorer les modélisations existantes en chargement statique monotone et en sollicitation Thermo-Hydro-Mécanique. Cet ANR, **Maîtrise Durable** de la **Fissuration** des **InfraStructures** en **bétOn**, est un appui pour CEOS.fr qui a donc pu s'investir sur la définition et la réalisation de corps d'épreuve innovants à l'échelle 1 et 1/3. L'axe modélisation a un rôle important à jouer dans la suite du projet pour analyser les résultats des essais, aider à leur interprétation par un dialogue essais-calcul qui viendra enrichir l'approche de l'axe ingénierie.

De cet échange, des expérimentations numériques, ayant pour objectif de permettre de définir ou d'améliorer les formules existantes, doivent être définies.

L'axe modélisation s'implique donc pleinement dans les deux autres axes, en participant à la définition des corps d'épreuve, en analysant les résultats des essais à travers la simulation numérique et en accompagnant l'ingénierie pour la définition de nouvelles formules plus proches des phénomènes physiques.



Simulation du comportement Thermique – Calcul de l'endommagement (LMDC).

# 2

## Axe Expérimentation : construire une base expérimentale complète

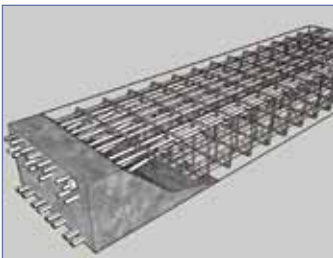
Le déroulement du programme d'essais de ce projet permet :

- le développement d'essais innovants (maquettes à l'échelle 1 et voiles à l'échelle 1/3) avec caractérisation fine des conditions aux limites et mesure du développement de fissures (espacement, ouvertures) notamment par corrélation d'images à différentes échelles de la fissuration,
- l'enrichissement et la calibration des modèles micro et macro par la réalisation de simulations prenant en compte les conditions limites réelles des essais et comparaison du post-traitement numérique et des mesures de fissurations constatées expérimentalement,
- le développement d'une base de données sur la fissuration des murs et des voiles obtenue par une campagne d'essais expérimentales d'ampleur, doublée d'expérimentation numérique.

Des essais spécifiques ont été étudiés et sont pratiquement intégralement réalisés dans le PN CEOS.fr :

- deux types d'essais sont prévus (sur une dizaine au total) sur blocs prismatiques (6,1 m x 1, 6 m x 0,8m), les uns en retrait libre testés en flexion monotone et les autres (3) en retrait gêné.
- blocs à l'échelle 1/3 : Le but de ce programme est de permettre de mettre en évidence d'éventuels biais expérimentaux liés à la prise en compte imparfaite des effets d'échelle dans les modélisations. En cours de définition finale, ce programme comprendra une douzaine d'essais sur corps d'épreuve semblables à certains des blocs de la tâche 2. Quelques-uns permettront de vérifier la répétabilité,
- voiles testés en cisaillement monotone et cyclique.

Une instrumentation novatrice est venue compléter les mesures standards. On dispose ainsi en plus des mesures de températures, déplacements, déformations et efforts, des mesures acoustiques et de l'analyse d'image pour caractériser la fissuration.



Essais de CEOS.fr - Bloc prismatique en retrait libre: conception, réalisation (Vinci Construction).

### 3

## Axe Ingénierie : faire avancer les méthodes et les pratiques d'ingénierie

Tout au long du projet, l'axe ingénierie a évalué, en parallèle des modélisations numériques, la pertinence des codes à prédire le comportement de corps d'épreuve, qu'il s'agisse du premier benchmark, ou bien des essais de CEOS.fr. L'écart entre les réponses de différents codes et les résultats d'essais a été évalué ce qui a permis de donner des pistes de réflexion et de préciser les expérimentations à produire.

A ce stade du projet un travail d'exploitation de tous les résultats d'essais est sous la responsabilité de cet axe. Il doit s'appuyer sur la simulation numérique pour l'aider dans son interprétation et sur les mesures de champ par corrélation d'images qui apportent des indications précises sur l'apparition et le développement de la fissuration.

Ce travail de dépouillement permettra d'avancer sur l'évolution des formules existantes, mais aussi sur les méthodes appropriées, couplant éventuellement calcul numérique simplifié et formules, à mettre à la disposition de l'ingénierie. L'établissement de ces nouvelles méthodes sera affiné en fin de projet à l'aide d'un panel d'expérimentations numériques ciblées.

Pour maintenir le lien permanent avec la communauté international, cet axe est très présent dans les travaux de la fib.

“L'établissement de ces nouvelles méthodes sera affiné en fin de projet à l'aide d'un panel d'expérimentations numériques ciblées.”

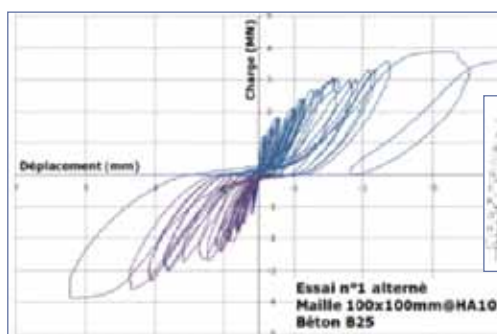


Avant coulage

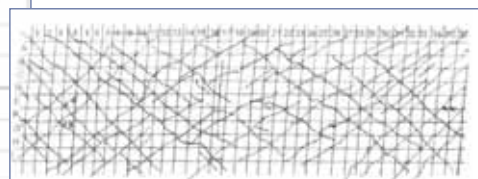
Essais CEOS.fr - Maquette Voile échelle 1/3 (CSTB).

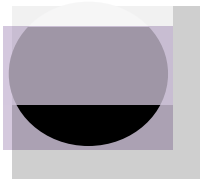


Après coulage



Comportement force – déplacement et relevé de fissuration du voile en B25 HA10.





## Organisation

### La Direction du Projet

- Président : Pierre LABBE (EDF DIN)
- Directeur technique : Philippe BISCH (IOSIS GROUP)
- Directeur scientifique : Jacky MAZARS (3S-R)
- Coordination : Danièle CHAUVEL (EDF) et Claude ROSPARS (IFFSTAR / 3S-R)

### Les partenaires

- Advitam - ANDRA - ARCADIS - AREVA - ATILH - Bouygues - CEA DEN/Saclay - CEA DPCL/Fontenay - Ginger CEBTP - CERIB - CETE Clermont Ferrand - CETU - Chryso - Coyne et Bellier (Tractebel) - CSTB - CTG (Italcementi) - Ecole Centrale de Nantes - EDF CIH - EDF R&D - EDF SEPTEN - EDF TEGG - LAMSID - Eiffage - ENPC - ENS Cachan (LMT) - FNTP - Freyssinet - HOLCIM - IOSIS Industries - INPG Grenoble (3SR) - INSA de Lyon - INSA de Toulouse (LMDC) - IRSN - LCPC - LaSaGeC (Anglet-Pau) - LERM - OXAND - Grand port maritime du Havre - Polytech Lille - SAIPM - SETEC TPI - SETRA - SITES - Solétanche/Bachy - SPI-Batignolles - VINCI CONSTRUCTION - J. Cortade, Expert



## Durée Budget

La Convention de base avec la DRAST a été signée en mars 2008. La durée prévisionnelle est de 4 ans (4 tranches de travaux). L'année 2011 est une année charnière puisque les développements de nouvelles modélisations se terminent, l'exploitation des essais expérimentaux également et la confrontation des deux permet l'émergence de nouvelles règles de calcul qui aboutiront en fin de projet.

Le budget prévisionnel s'élève à 5 624 728 € HT, dont une subvention de la DRI du MEDDTL de 1 079 365 €, le solde financé par les partenaires.



## Publications

Chaque thème de recherche et chaque axe de travail font l'objet de rapports réguliers (au moins un en fin de tranche, par thème et pour chaque axe), auxquels s'ajoutent des documents édités lors d'opération visant à ouvrir à la communauté internationale.

On peut citer :

- L'organisation du workshop international (9-11 décembre 2009, Control of Cracking in RC structures – ConCrack1, Paris) avec la parution de proceeding et l'édition d'un CDRom contenant les résultats du benchmark CEOS.fr effectué en tranche 1 sur la base d'essais disponibles dans la littérature, les premières conclusions des partenaires ainsi que les contributions (articles et présentations) des participants du workshop.
- Le lancement d'un benchmark international en juillet 2010, Concrack ([www.Concrack.com](http://www.Concrack.com)), lancé entre l'été 2010 et janvier 2011 sur la base des expérimentations réalisées dans CEOS.fr sur la 2<sup>ème</sup> tranche et le début de la 3<sup>ème</sup> tranche. Les 30 participants inscrits (extérieurs au PN et principalement étrangers (11 pays européens, 3 USA, 2 Japon, 1 consortium d'Amérique du Sud) rendront leurs résultats en début 2011.
- L'organisation d'un workshop de restitution de ce benchmark, ConCrack 2 (20-22 juin 2011, Paris).
- La réalisation d'un site de stockage de l'intégralité des données brutes des essais réalisés pendant CEOS.fr [www.Simon-e.fr](http://www.Simon-e.fr) et accessible à tous les partenaires.
- Une base de données capitalisant les données traitées, les résultats par essais est en cours de réalisation.

D'autre part :

- Les recherches menées par le Projet National ont fait l'objet de présentations dans plusieurs colloques ou congrès internationaux, ainsi qu'à des colloques fib.
- L'intégralité de ces données est disponible auprès de l'IREX. Les résultats du Projet National CEOS.fr seront publiés dans des guides édités par l'IREX et /ou les Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées.
- Une première édition, à mi-parcours (mars 2011), est prévue sur le thème : "Le contrôle de la fissuration des structures en béton armé : un point majeur pour leur durabilité". Elle regroupera les travaux du 1<sup>er</sup> benchmark de CEOS.fr (Workshop International 9-11 décembre 2009), les conclusions sur la modélisation et les prévisions de fissuration par type de chargement et les améliorations développées en vue de répondre au cahier des charges du Projet National.

# Applications et retombées du Projet National

## L'objet majeur des travaux du Projet National CEOS.fr :

■ est d'améliorer de façon significative les pratiques de l'ingénierie pour évaluer les processus de fissuration dans les structures en béton, béton armé, béton précontraint et de prédire leur évolution au cours de la durée de vie des ouvrages.

## Ce point a été rendu possible grâce :

■ à l'amélioration et à de nouveaux développements dans les techniques de modélisation associées à la prévision de la fissuration liée à des chargements mécaniques (monotones, cycliques) et des chargements thermo-hydro-mécaniques couplés (THM), si importants au jeune âge et à long terme.

Ceci grâce à un travail de fond conduit dans le cadre d'un programme ANR dédié (Mefisto) et des échanges croisés avec la communauté internationale du domaine (benchmark et workshops internationaux ConCrack organisés dans le contexte du PN CEOS.fr).

## Les retombées majeures de ces avancées sont :

■ la fourniture aux concepteurs d'ouvrages, d'outils d'ingénierie efficaces, précis et fiables sous 2 formes :  
- ceux à base de descriptions par éléments finis « simplifiés » ;  
- et ceux conçus sous la forme de méthodes et relations analytiques pouvant être incluses dans les codes de conception notamment les Eurocodes.

■ un meilleur contrôle de la fissuration, contrôle qui est essentiel pour maîtriser la durabilité des ouvrages en béton.

## A noter enfin que :

■ Les recherches menées dans le cadre du PN CEOS.fr ont été reconnues comme étant d'un intérêt primordial pour la communauté internationale. Ceci a conduit les experts français à être invités à une participation élargie et plus active dans les travaux de la *fib* ayant trait au développement de codes de construction, afin que la communauté tire profit des idées et des résultats en cours de développement obtenus en France.

“ Les recherches menées dans le cadre du Projet National CEOS.fr ont été reconnues comme étant d'un intérêt primordial pour la communauté internationale. ”

Barrage. © EDF

