



PROJET NATIONAL CEOSFR

**COMPORTEMENT ET EVALUATION DES
OUVRAGES SPECIAUX
FISSURATION – RETRAIT**

Programme général

(Durée 4 ans)

FEVRIER 2008

TABLE DES MATIERES

0 – PRESENTATION GENERALE

1. Contexte industriel
2. Objectifs du projet
3. Pratique actuelle pour évaluation de la fissuration
4. Philosophie générale de la recherche
5. Organisation de la recherche pour répondre aux objectifs

I – FISSURATION SOUS CHARGEMENT STATIQUE MONOTONE

1. La problématique
2. Les objectifs
3. L'état de l'art
4. Méthodologie transversale adoptée

II – COMPORTEMENT THM DES OUVRAGES EN BETON

1. La problématique
2. Les objectifs
3. L'état de l'art
4. Méthodologie transversale adoptée

III – FISSURATION SOUS CHARGEMENT CYCLIQUE

1. La problématique
2. Les objectifs
3. L'état de l'art
4. Méthodologie

IV – MODELISATION : SYNTHESE COLONNE 1

1. Introduction
2. Organisation en chantiers
3. Actions proposées
4. Méthodes de travail et organisation
5. Livrables

V – EXPERIMENTATION : SYNTHESE COLONNE 2

1. Introduction
2. Données déjà disponibles
3. Essais propres au Projet CEOSFR
4. Livrables

VI – REGLEMENTATION et PRATIQUE d'INGENIERIE : SYNTHESE COLONNE 3

1. Introduction
2. Objectifs en termes d'ingénierie et de normalisation
3. Besoins en connaissance – Recherche et expérimentations nécessaires
4. Listes de tâches
5. Méthodes de travail et organisation
6. Livrables

VII – VALORISATIONS

1. Phase 1 : au lancement du Projet
2. Phase 2 : pendant la réalisation du Projet
3. Phase 3 : en fin de Projet

VIII – RETOMBÉES ATTENDUES EN PROGRES TECHNIQUES : SOCIO-ECONOMIQUES ET REGLEMENTAIRES

IX – ORGANISATION ET FONCTIONNEMENT

1. Pilotage du Projet
2. Fonctionnement opérationnel

X – BUDGET PREVISIONNEL GLOBAL

XI – PARTENAIRES POTENTIELS

XII – PLAN PREVISIONNEL DE FINANCEMENT

XIII – PLANNING

XIV – ANNEXES

1. Annexe 1 : liste des ouvrages et maquettes mis à disposition
2. Annexe 2 : apport des autres projets
3. annexe 3 : références

Projet National CEOSFR

Comportement et Evaluation des Ouvrages Spéciaux

Fissuration Retrait

0 - Présentation générale

1. Contexte industriel

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 ou encore rémanant après un état limite ultime.

2. Objectifs du projet

Le contrôle de la fissuration est important pour le bon comportement des ouvrages, par exemple :

- Pour les ouvrages d'infrastructure, pour leur bonne fonctionnalité, parfois pour leur sécurité. En particulier, lorsque les déformations sont gênées, la fissuration mal maîtrisée peut être à l'origine de désordres dommageables (revêtements de tunnels, dalles de ponts mixtes, glissières en béton...).
- Pour les ouvrages industriels, une fissuration excessive peut être dommageable pour leur bonne fonctionnalité, par exemple : étanchéité, tenue des ancrages d'équipements, etc. Elle est en relation directe avec les capacités de confinement (nucléaire, chimie, biologie...), donc avec la sécurité des personnes.
- Pour les ouvrages de prestige, elle joue un rôle important dans le maintien de l'esthétique sur le long terme.

En outre, la fissuration a une influence directe sur la durabilité de tous les ouvrages, donc sur leur coût global.

L'objectif général du projet est de faire progresser de façon significative les outils et les pratiques d'ingénierie en matière d'estimation et de prédiction de l'état d'endommagement lié à la fissuration des éléments de structures en béton armé ou précontraint en fonction des actions auxquelles ils sont soumis.

Cet objectif principal est décliné suivant trois thèmes mettant en jeu des phénomènes physiques différents et pouvant donc, s'il y a lieu, faire appel à des méthodes différentes.

- Fissuration sous chargement statique monotone : il s'agit ici dans un premier temps de calibrer les méthodes existantes et surtout de définir leurs domaines de validité. En effet, ces méthodes ont été généralement établies à partir d'expérimentation sur des tirants et des poutres en flexion, mais il est reconnu qu'elles ne donnent pas des résultats convenables pour des structures tels les voiles ou coques ou des ouvrages spéciaux mobilisant des volumes importants de béton. Il est donc attendu ici l'élaboration de nouvelles méthodes et formules donnant des résultats plus adaptés à ce type d'ouvrages.
- Comportement thermo-hydro-mécanique. Il s'agit ici d'étudier divers phénomènes en relation avec la déformabilité du béton : comportement au jeune âge, effet du séchage naturel sur le long terme, effet des conditions aux limites (déformations

gênées). Le traitement de ce thème implique la prise en compte et donc une bonne maîtrise de phénomènes physiques, par exemple ceux liés à la chaleur d'hydratation dans les pièces massives, le retrait d'auto-dessiccation, etc.

- Fissuration sous séisme. Ce thème est lié en particulier à la sécurité des confinements, pour lesquels il est nécessaire de connaître la fissuration maximale en cours de séisme, mais également la fissuration résiduelle après séisme. Il implique d'étendre les méthodes et formulations à des états limites ultimes accidentels ou quasi-accidentels. D'autre part, cela met en jeu le facteur temps, qui sera pris en compte sous forme de sollicitations alternées. Ceci permettra d'étendre les résultats obtenus à d'autres types de sollicitations cycliques.

Concrètement, ces progrès doivent servir notamment :

- à optimiser pour ce type de structures les quantités de béton et d'acier selon les états limites et fonctionnalités de l'ouvrage ;
- à réaliser des calculs prédictifs plus opérationnels pour les bureaux d'études, plus fiables et plus précis. Il s'agit d'une part de développer des outils d'ingénierie basés sur une exploitation de modèles éléments finis praticable dans les projets en termes de coûts et de délais, d'autre part de développer des formules analogues à celles existantes, permettant de couvrir les champs d'ouvrages et de sollicitations visés par le projet ;
- à prendre en compte la fissuration pour analyser l'histoire des chargements qu'a subi un ouvrage et l'évolution de son comportement dans le temps.

Cette avancée des connaissances devrait permettre d'influer sur l'évolution des normes de conception, notamment l'Eurocode 2, pour permettre une meilleure appréciation codifiée de la fissuration dans les domaines couverts par le projet.

Le projet permettra enfin, de par sa constitution même, des progrès dans la modélisation fine des phénomènes étudiés et dans certains domaines liés à l'expérimentation, notamment l'instrumentation.

3. Pratiques actuelles pour évaluer la fissuration

La conception des structures en béton est aujourd'hui basée selon l'Eurocode 2 sur une approche de type performancielle (durabilité et fonctionnalité aux états limites de service). L'ouverture et l'espacement des fissures sont estimés à l'aide de formules qui apportent des solutions relativement satisfaisantes pour des tirants et des poutres en flexion (validation expérimentale sur des structures élémentaires). L'expérience a montré qu'elles pourraient être mises en cause pour les voiles ainsi que pour d'autres éléments structuraux comme les ouvrages spéciaux. D'autres formules existent dans la littérature, mais elles ont toutes leurs domaines de validité qu'il conviendrait de bien préciser, ce qui fait partie du projet.

Ainsi, les outils de calcul à disposition de l'ingénierie ne sont pas suffisants pour déterminer un état représentatif de la fissuration des structures en béton armé ou précontraint, notamment lorsque celles-ci sont bidimensionnelles et/ou relativement épaisses et/ou soumises à des sollicitations sévères thermiques ou hydriques. Par exemple, l'humidité est négligée dans des formulations 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).

En situation sismique, il n'existe pas de règle standardisée pour évaluer la fissuration en cours de séisme et après séisme, les formules existantes ne traitant ni des ELU, ni des sollicitations cycliques.

Pour ce qui concerne la modélisation numérique fine, il peut être envisagé, pour disposer de calculs plus réalistes au plan physique, de recourir à des lois de comportement non linéaires pour la fissuration du béton et l'adhérence acier-béton. Mais l'exploitation locale des résultats de ces calculs, en termes d'espacement et d'ouverture de fissures, se heurte à des difficultés. En effet, même si la communauté des chercheurs a proposé un certain nombre de pistes pour ce type d'approche, aucun modèle n'est actuellement suffisamment fiable en lui-même pour être intégré aux pratiques courantes de l'ingénierie. En outre, un certain nombre de phénomènes interviennent dans la fissuration pour lesquels on ne dispose généralement pas de données amont suffisantes pour pouvoir les prendre en compte.

4. Philosophie générale de la recherche

Afin de permettre une avancée significative par des résultats utilisables dans les projets, il est proposé une recherche alliant expérimentation sur corps d'épreuve et expérimentation numérique.

En effet, l'expérimentation sur maquette visant à représenter des structures réelles se heurte à un certain nombre de difficultés : choix des matériaux, respect des règles de changement d'échelle... Ainsi, les moyens à mettre en œuvre sont très importants, en matériel et donc en coût. Peu d'installations en France et même en Europe sont en mesure de mettre en œuvre de tels moyens. Il

est donc peu envisageable d'essayer un nombre de corps d'épreuves suffisant pour obtenir une formulation fiable. D'où l'idée proposée ici de coupler expérimentation numérique et expérimentation sur maquettes afin de permettre, par le calcul, de couvrir un champ suffisamment large.

La variabilité ou la sensibilité aux paramètres des modèles ayant une conséquence sur l'état de fissuration sera abordée ainsi que certains aspects liés à l'effet d'échelle. L'étude d'impact de ces deux problèmes sur les prédictions de comportement est un vaste sujet et le Projet National n'a pas l'ambition de le traiter de façon exhaustive.

Les études de CEOS.fr se placent à l'échelle de la structure, sans rentrer dans l'examen détaillé et direct des phénomènes concernant la microstructure. Les partenaires proposent de s'intéresser aux lois qui donnent simplement l'ouverture et l'espacement des fissures et d'étudier la sensibilité de ces lois à la variation des paramètres d'entrée.

Pour cela, on peut imaginer des processus allant de la simple dérivation mathématique de la formule jusqu'au traitement probabiliste (Monté Carlo ou méthode FORM [HEI 98]), sous réserve de déterminer une fonction de marge pertinente. A ce stade, on doit avoir accès aux poids respectifs des valeurs moyennes mais aussi des dispersions autour de ces moyennes.

Une fois les paramètres prépondérants identifiés, on recensera les informations réellement disponibles sur ces paramètres, afin de déterminer leur plage d'incertitude. On pourra alors effectuer un calcul probabiliste pour estimer les distributions aléatoires des espacements et ouvertures. Si ces dernières sont d'amplitudes raisonnables, CEOS.fr fournira à la profession des informations quantitatives sur la fiabilité des prédictions lorsque l'on utilise une loi donnée avec des valeurs de paramètres correctement évaluées.

En conséquence, la recherche proposée pourrait comporter notamment les actions principales suivantes :

- ❑ Etat des lieux sur les aspects expérimentaux et modélisation numérique (mise en commun de données issues d'ouvrages ou d'expérimentations);
- ❑ Montage d'expérimentations comprenant des tests monotones et/ou cycliques sur des éléments de structures représentatifs, incluant une recherche des meilleures méthodes d'instrumentation des fissures ;
- ❑ Proposition d'au moins deux approches de modélisation numérique pour mener à bien des calculs de structures en béton et les exploiter en terme de fissuration. Une approche de premier niveau devra être accessible aux bureaux d'études via un minimum d'investissement, une autre approche plus perfectionnée permettra de mettre en perspective les apports de la R&D en Génie Civil dans les années futures ;
- ❑ Mise au point de modèles numériques d'éléments en béton armé calés sur des essais d'éprouvettes à petite échelle puis confrontés aux expérimentations en vraie grandeur ;
- ❑ Définition des structures à étudier par expérimentation numérique sur un grand nombre de cas ;
- ❑ Etablissement et validation de méthodes d'ingénierie (notamment pour la prévision des espacements et des ouvertures des fissures) sur la base de l'exploitation des résultats expérimentaux et numériques et d'une forfaitisation des effets de la partie incertaine des historiques de chargement (au sens large du terme : mécanique, thermique, hydrique) : effet du passage de construction, du retrait, du fluage, du thermique climatique, etc.

5. Organisation de la recherche pour répondre aux objectifs

Les thèmes sont abordés par thème scientifique, ces principaux thèmes étant l'étude de :

- ❑ la fissuration sous chargement statique monotone,
- ❑ le comportement thermo-hydro-mécanique (THM) des ouvrages en béton,
- ❑ la fissuration sous chargement cyclique et rémanent (après séisme).

Pour assurer une cohérence du projet, ces thèmes seront abordés au travers des modélisations adaptées, de l'expérimentation (allant de l'échelle du laboratoire aux grands ouvrages) et des réflexions sur la réglementation.

Une structure matricielle a donc été définie. Les coordinateurs de ligne (chap. I, II et III de cette note) impulsent la cohérence de ces thématiques scientifiques, aidés par les coordinateurs de colonne (chap. IV, V, VI) qui s'assurent de la réponse aux objectifs du projet que sont :

- ❑ l'utilisation et l'amélioration de la modélisation en s'appuyant sur l'expérimentation,

- la validation de ces modèles physiques et sur ouvrages réels représentatifs des besoins de l'ingénierie,
- la réflexion sur les résultats obtenus pour l'amélioration des pratiques usuelles d'ingénierie, l'aboutissement de formulations simplifiées et donc à terme l'évolution des réglementations.

Les coordinateurs de colonnes organisent le lotissement, le budget et le suivi des actions. Ils sont aidés par les pilotes des ateliers appelés chantiers par la suite (cf. matrice fonctionnelle chap. VIII). Tous sont membres du Comité de Pilotage. Les chantiers sont repérés dans la présente étude par leur position (n° ligne, n° colonne) dans cette matrice fonctionnelle. La description thématique des recherches est donc présentée dans les chapitres I à III, et les moyens mis en œuvre pour répondre à ces objectifs sont présentés chapitre I à VI.

I - Fissuration sous chargement statique monotone

Coordinateur Ludovic Jason, CEA Saclay DM2S

1. La problématique

Il s'agit ici de caractériser la fissuration des ouvrages dans le cas de chargements statiques monotones, les outils développés pouvant ensuite servir de point de départ dans d'autres situations (thermo – hydro – mécanique – partie II – ou cyclique – partie III).

2. Les objectifs

Il s'agit dans le cadre de ce travail d'améliorer et d'adapter les pratiques actuelles pour évaluer les risques de fissuration des ouvrages soumis à des chargements statiques monotones.

La conception des structures en béton est aujourd'hui basée selon l'Eurocode 2 sur une approche de type performancielle (durabilité et résistance 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). L'expérience a montré qu'elles devaient être adaptées pour les voiles ainsi que pour d'autres éléments structuraux (ouvrages spéciaux).

L'objet de ce travail est donc l'analyse et la compréhension de la réglementation et des pratiques d'ingénierie concernant la maîtrise de la fissuration d'éléments de structures. On cherchera ainsi à acquérir une connaissance théorique, basée sur l'expérimentation et la modélisation numérique. Les objectifs concernent :

- ❑ la mise au point d'outils d'ingénierie suffisamment simples pour être utilisés par les professionnels des études de Génie Civil,
- ❑ la validation du domaine d'application des règles existantes afin de proposer des méthodes réglementaires pour les ouvrages sortant du domaine d'application courant.

3. L'état de l'art

La modélisation de la rupture des milieux hétérogènes quasi-fragiles (bétons, roches, céramiques...) est en évolution constante depuis une vingtaine d'années. Le problème posé dans la pratique est la mise en œuvre de moyens de simulation numérique pour décrire la fissuration du matériau sous chargements mécaniques monotones ou cycliques et couplés.

L'une des manières les plus intuitives de représenter la fissuration est de matérialiser la discontinuité (approches discrètes). C'est ce que se proposent de faire les techniques de type « fissure discrète » (discrete crack approach) (Ingraffea et Saouma, 1985). La fissure se propage dès que la force nodale en bout de fissure dépasse un critère de rupture en traction. Le nœud correspondant est alors scindé en deux nouveaux nœuds distincts et la pointe de fissure avance d'un incrément. L'inconvénient majeur de cette technique est que la fissure ne peut se propager que sur les frontières des éléments du maillage. La même limitation est observée avec les techniques de type « éléments joints », pour lesquels des éléments d'interface sont ajoutés entre deux mailles du modèle éléments finis afin de prendre en considération le comportement particulier de la discontinuité (de Borst, 2003).

Les approches enrichies constituent une alternative aux méthodes discrètes. Elles sont basées sur un enrichissement des degrés de liberté des éléments finis classiques, de manière à autoriser une discontinuité du champ de déformation et / ou de déplacement. On distingue en particulier, les approches de type « strong / weak discontinuity » (Fernandez et Ayala, 2004), les méthodes d'enrichissement de la cinématique de l'élément (Jirasek, 2000) ou les techniques de type « Extended Finite Element Method » (XFEM) (Moes et al, 1999) qui exploitent la propriété de partition de l'unité des fonctions de forme des éléments finis. Outre la complexité des méthodes mentionnées, elles nécessitent une augmentation du nombre de degrés de liberté aux nœuds qui peut empêcher leur application à des cas industriels.

Les approches continues se basent sur la mécanique des milieux continus pour décrire le comportement du béton. La discontinuité liée à la fissuration n'est donc pas représentée en tant que telle mais par l'intermédiaire de variables internes (endommagement, déformations irréversibles, tenseur de contraintes orienté...). On citera tout d'abord les « smeared crack models » (Rashid, 1968) pour lesquels une relation orthotrope entre contraintes et déformations est donnée. Les modèles d'endommagement et / ou de plasticité introduisent l'effet de la fissuration, soit par une dégradation de la raideur élastique du matériau (endommagement, (Mazars et Pijaudier-Cabot, 1996)), soit par une surface de plasticité adaptée (Grassl et al, 2002 par exemple). Néanmoins, la localisation des déformations, propre au régime adoucissant, impose le recours à une technique de régularisation (intégrale (Pijaudier – Cabot et Bazant, 1987), ou gradient (Peerlings et al, 1996) par exemple) afin d'obtenir une réponse indépendante de la discrétisation spatiale. De plus, sauf exception (prise en compte des caractéristiques des fissures dans les variables internes), aucune information n'est généralement donnée concernant les caractéristiques des fissures obtenues (ouverture et / ou espacement), des outils supplémentaires devant alors être envisagés (post – traitement par exemple).

Enfin, des approches, dites mixtes, tentent de palier aux inconvénients des méthodes précédemment décrites. Le principe est de combiner les avantages de deux formulations, de manière à décrire plus précisément la fissuration durant la totalité du chargement (micro et macro fissuration) (modèle continu et Extended Finite Element Method, (Comi et al, 2007) par exemple, modèle à ouverture unitaire de fissure (Matallah et al, 2006)). Ces méthodes récentes et prometteuses doivent néanmoins être validées avec soin (domaine de validité, choix du critère de passage entre les deux formulations, utilisations industrielles...).

4. Méthodologie transversale adoptée

Afin de permettre une avancée significative par des résultats utilisables dans les projets, il est proposé une recherche alliant expérimentation sur corps d'épreuve, expérimentation numérique et participation à la réflexion sur l'amélioration des pratiques d'ingénierie.

4.1. La réglementation et les pratiques d'ingénierie

Quatre besoins ont été identifiés pour la fissuration du béton armé ou précontraint sous charges statiques monotones :

- ❑ Etablir le domaine de validité des méthodes actuelles exposées dans les diverses normes et règles techniques ainsi que leur pertinence (pertinence des deux formules permettant de calculer l'espacement des fissures en fonction de l'enrobage, de la dimension du tirant équivalent en flexion et du diamètre des barres, par exemple).
- ❑ Etudier la fissuration des pièces sortant des limites précédemment établies (pièces épaisses – voiles, radiers, semelles – ou des pièces minces ou épaisses très peu ferrillées soumises à des déplacements imposés gênés).
- ❑ Etablir de nouvelles formules pour le ferrillage minimal pour des éléments de structures minces ou épais lorsqu'ils sont soumis à des déplacements gênés ou à des variations de contraintes internes, de façon à éviter par exemple que pour des structures épaisses le pourcentage d'armatures soit proportionnel à l'épaisseur.
- ❑ Estimer l'importance des fissures et celle des déformations qui en résultent dans les armatures.

Les travaux de R&D et les études de cas en modélisations envisagées dans le cadre de ce projet, serviront à expertiser les phénomènes physiques en jeu pour permettre la mise au point de nouvelles méthodes simplifiées d'ingénierie. Ils valideront aussi ces nouvelles méthodes par extrapolation vers des applications et configurations pour lesquelles les résultats d'essais sont plus rares.

4.2. Modélisation numérique de la fissuration sous chargement statique

Cette action a pour but de mettre en place le cadre théorique et pratique définissant des règles de correspondance entre les résultats de simulation et les mesures expérimentales dans le cas d'un ouvrage soumis à un chargement statique monotone. L'objectif est ici de quantifier la fissuration, c'est-à-dire d'obtenir des informations concernant la position, l'ouverture et la direction des fissures induites par le chargement imposé.

L'étude bibliographique met en évidence les pistes envisagées pour caractériser la fissuration sous chargement statique monotone :

- ❑ Utilisation et validation d'approches continues régularisées associées, si besoin, à des techniques de post traitement.
- ❑ Utilisation et validation d'approches mixtes afin de combiner les avantages de plusieurs formulations.

Par ailleurs, s'agissant d'ouvrages en béton armé ou précontraint, le matériau est composite et, à ce titre, les approches précédemment citées doivent intégrer l'association des matériaux béton et acier, ce qui n'est pas toujours sans poser des problèmes numériques notamment dans les phases d'endommagement et de fissuration.

Compte tenu de ces pistes, le programme de recherche pour ce thème scientifique s'articule autour des points suivants :

- **L'utilisation et la validation d'approches** adaptées à la description de la fissuration sous chargement statique. Deux approches semblent particulièrement à étudier :
 - Approches continues combinées à une technique de post – traitement. Il s'agira de valider des techniques de post-traitement permettant, à partir de la donnée d'une variable d'endommagement continue, de fournir des informations concernant l'ouverture et l'espacement des fissures.
 - Approches mixtes (continu – XfeM, continu – discret ou approches probabilistes par exemple). Un deuxième axe pour caractériser la fissuration concerne l'association de différents modèles, soit pour représenter les phénomènes de fissuration à différentes échelles (locale – globale, micro-macro), soit pour combiner les avantages des différents choix de modélisations (continu-discret par exemple). L'objectif sera alors d'évaluer l'apport de ces techniques par rapport à des méthodes plus simples et plus directes.
- **la validation expérimentale des modèles.** Il s'agit ici de proposer et de réaliser un ensemble de tests élémentaires et structurels (taille restreinte) nécessaire à la validation des modèles. L'utilisation d'approches récentes passe en effet par une caractérisation (détermination des paramètres d'entrée) et une validation (estimation de la capacité de l'approche à répondre aux besoins) expérimentales. Le groupe « Modélisation » pour les chargements statiques monotones aura en charge la réalisation d'essais à l'échelle de l'éprouvette (solicitations uniaxiales ou multiaxiales) et de la petite structure (tirant en béton armé, poutre en flexion trois ou quatre points).
- **La validation « projet » des modèles.** Il s'agit ici de s'interroger sur la relation entre les besoins du projet qui s'appuie sur des modèles généralement conçus et validés dans un cadre bien conditionné de laboratoire et la réalité des ouvrages. Deux aspects sont à traiter dans ce cadre :
 - la variabilité des paramètres, notamment ceux liés aux propriétés des matériaux,
 - l'effet d'échelle, qui doit conduire à transposer les acquis sur corps d'épreuves de laboratoire aux dimensions de l'ouvrage.

La variabilité intrinsèque et spatiale des propriétés des matériaux conduit à considérer celles-ci comme variables aléatoires. Les procédures de calculs qui utilisent ces concepts, tels les éléments finis stochastiques, permettent de répondre à la question « quelle est l'influence des variabilités des propriétés des matériaux sur la réponse de la structure ». L'objectif ici sera de focaliser sur les paramètres les plus influents vis-à-vis de la fissuration (module d'élasticité et résistance en traction du béton) à partir de bases de données permettant d'évaluer les différents indicateurs statistiques (moyenne, variance, ...) et de réaliser des études de cas.

L'effet d'échelle est une autre source de difficultés d'autant plus importante que l'on s'intéresse aux pièces dont les dimensions s'écartent de celles habituellement considérées en laboratoire. Le caractère hétérogène, poreux et les couplages hydro-mécaniques au sein du matériau béton sont à l'origine de ce phénomène. Les modèles qui intègrent ces différentes notions peuvent, au moins partiellement, rendre compte de cet effet. Cependant peu de données expérimentales sont disponibles pour les valider. Sur la base d'une expérimentation simple (poutre en flexion à 2 échelles) l'objectif sera ici d'évaluer l'intensité du phénomène et de calibrer les modèles qui sont capables de le représenter.

Ce travail aboutira, en association avec le groupe « Ingénierie » et après valorisation des résultats du groupe « Expérimentation », à la proposition d'une méthodologie en direction de l'ingénierie, sous une forme à définir (abaque, guide méthodologique...) afin de permettre de répondre aux besoins en terme de règles mis en évidence dans les paragraphes précédents.

4.3. L'expérimentation

Le groupe « Modélisation » aura en charge la définition des essais à l'échelle de l'éprouvette et de la petite structure, qui sera traitée par le groupe de travail « Expérimentation » du projet national. Sont inclus dans la partie « expérimentation » les expérimentations des ouvrages réels et les maquettes de grandes dimensions qui permettront la validation *in fine* des approches de modélisation et l'évolution des pratiques d'ingénierie.

Les retours d'expérience d'expérimentations sur ouvrages existants ou déjà testés seront en particulier à prendre en considération.

II - Comportement THM des ouvrages en béton

Coordinateur Jean-Michel TORRENTI, LCPC Paris

1. La problématique

Les ouvrages en béton sont soumis à des sollicitations thermiques, hydriques qui se traduisent par des déformations imposées pouvant conduire à une fissuration pratiquement impossible à empêcher mais qu'il convient de maîtriser.

Notamment pour les structures massives, les sollicitations thermo-hydro-mécaniques (THM) couplées à l'hydratation peuvent conduire à un surdimensionnement en armatures lié au mode actuel de prise en compte de ces actions. Ce surdimensionnement peut conduire à des problèmes de mise en œuvre et de surcoût, sans pour autant être d'une efficacité mécanique optimale puisque des problèmes de fissuration peuvent malgré cela apparaître dans les zones de singularité géométrique des ouvrages. Certaines parties de l'ouvrage se trouvent ainsi sur-armées et d'autres sous-armées. Ces problèmes sont d'autant plus difficiles à appréhender qu'ils échappent généralement au domaine d'application des règles de calcul telles que celles proposées dans l'EC2.

2. Les objectifs

Améliorer et adapter les pratiques d'ingénierie actuelles pour évaluer les risques dans le cas des chargements thermiques, hydriques et chimiques.

La principale difficulté du calcul de la fissuration sous l'effet de déformations imposées tient au caractère non linéaire du phénomène qui nécessite dès le stade d'état limite de service de tenir compte de la perte de résistance en traction du béton pour estimer l'état de contrainte et de fissuration de la pièce et obtenir un dimensionnement économique d'une structure durable. L'état de contrainte dépend aussi de la façon dont les déformations sont gênées (dalle sur le sol, levée de bétonnage sur un béton plus ancien, dalle coincée entre des voiles massifs, voiles de façade de bâtiment soumis aux variations climatiques et gênées par les planchers, gradient thermique dans un voile ou une dalle...).

Une autre difficulté est l'estimation de la répartition des déformations dans la pièce de béton qui dépend des caractéristiques thermiques du béton et de l'évolution de l'humidité du béton. En particulier, pour des pièces épaisses, la répartition des déformations dans l'épaisseur de la pièce n'est pas linéaire et génère un état complexe d'autocontraintes, qui n'est pas considéré dans l'EN1992-1-1.

Enfin, dans le cas de pièces épaisses, l'état de contrainte d'origine mécanique est souvent faible et les contraintes dues aux déformations imposées peuvent devenir prépondérantes sans que les tractions soient très fortes par rapport à la résistance du béton. Il en résulte une fissuration qui n'est pas toujours systématique et l'application de l'EN1992-1-1 avec des enrobages et des diamètres d'armatures relativement forts conduit à des valeurs d'ouverture de fissures excessives par rapport à ce qui peut être mesuré sur site ou sur maquette.

3. Etat de l'art

La prévision du comportement des structures en béton sous sollicitations thermo-hydro-mécaniques (THM) implique de connaître le comportement intrinsèque du béton : comportement chimique (au jeune âge) et thermique, comportement hydrique et couplages avec le comportement mécanique. Le comportement au jeune âge fait intervenir la chimie (hydratation) et ses conséquences thermiques (exothermie de la réaction d'hydratation), hydriques (auto-dessiccation) et mécaniques (évolution des propriétés mécaniques et retrait endogène). Les contraintes induites au jeune âge peuvent être quasi-permanentes en raison des systèmes d'auto contraintes issues d'une hydratation non homogène ou de conditions aux limites particulières. Elles peuvent également se traduire par une fissuration des pièces. Les actions hydriques conduisent à l'apparition de pressions ou dépressions internes et vont se traduire par des déformations (retrait, fluage) et par de la fissuration. La prédiction de ces pressions nécessite une bonne connaissance du matériau (isothermes de sorption-désorption, perméabilité...). Enfin l'action thermique, entraîne une déformation (dilatation), mais aussi des déformations spécifiques (fluage transitoire) et un couplage avec les autres phénomènes (accroissement de la vitesse de fluage, modification des propriétés physiques et mécaniques à haute température).

La modélisation du comportement au jeune âge des bétons a fait de nombreux progrès ces dernières années et un corpus scientifique commun est largement partagé (voir par exemple [Acker, Torrenti, Ulm, 2004]). Les modèles sont capables de prédire avec une grande précision l'histoire des températures dans les structures, l'évolution de l'hydratation et le couplage avec la mécanique. Pour le séchage, les modèles permettent également de prédire les pertes de masse, l'évolution des champs de teneur en eau dans les structures et les conséquences mécaniques de ce séchage (retrait, endommagement). Pour le thermique enfin,

des avancées importantes ont été réalisées même si la question de la prédiction des déformations à haute température est encore un sujet de recherche.

Le principal point restant à traiter par rapport à l'objectif du projet est le passage de ces modèles, continus sauf rares exceptions, à des modèles donnant une description fidèle de l'état de fissuration (espacement et ouverture des fissures). Il reste aussi un certain nombre de lacunes à traiter comme le couplage séchage – hydratation (dont auto-dessiccation), le séchage en conditions cycliques (en tenant compte des hystérésis pouvant exister), l'effet de la température sur le fluage (y compris au jeune âge), le fluage tertiaire en traction.

4. Méthodologie transversale adoptée

Afin de permettre une avancée significative par des résultats utilisables dans les projets, il est proposé une recherche alliant expérimentation sur corps d'épreuve, expérimentation numérique et réflexion sur l'amélioration des pratiques d'ingénierie définie dans trois chantiers.

4.1. La réglementation et les pratiques d'ingénierie

Les pratiques d'ingénierie actuelles pour résoudre ce problème restent empiriques et disparates. Elles s'appuient sur quelques éléments de la réglementation permettant d'estimer les lois contraintes-déformations ou effort-déplacements pour justifier la résistance et/ou sur des règles de ferrailage minimal.

Cinq besoins se font sentir pour la fissuration sous déformations imposées :

- justification de la fissuration sous déformation imposée,
- validation des caractéristiques thermiques du béton pour des pièces épaisses,
- état de contrainte de structures types sous déformations imposées en fonction du type de blocage,
- ferrailage minimal permettant la répartition des fissures sous déformations imposées,
- analyse des courbes effort-déplacement (ou moment-courbure) dans le domaine de la formation des fissures.

4.2. La modélisation

Pour répondre à la problématique industrielle concernant l'élaboration de règles de dimensionnement performantes, la démarche proposée dans ce projet consiste à s'appuyer sur des résultats d'analyses numériques fines appliquées à des structures modèles instrumentées. Différents modèles et les moyens expérimentaux des différentes équipes du projet seront utilisés pour réaliser ces analyses. Les modèles numériques utilisés sont tous basés sur des formulations aux éléments finis ; ils intègrent les phénomènes non linéaires (endommagement, plasticité, fluage...) au niveau constitutif et parfois également à l'aide d'éléments d'interface entre les éléments finis. Outre le comportement THM non linéaire court terme, certains considèrent avec attention les phénomènes de déformations différées et les phénomènes liés à l'hydratation. On peut considérer que ces modèles sont arrivés à une certaine maturité au sens qu'ils sont capables de reproduire une grande partie des comportements couplés de manière physique. Ils seront donc appliqués afin de répondre aux questions posées par la réglementation : avoir une description fidèle de l'état de fissuration, i.e. l'espacement et l'ouverture des fissures.

D'autre part les modélisations seront confrontées à divers résultats expérimentaux, en particulier pour traiter certains points qui ne sont pas encore bien pris en compte (cf. état de l'art) :

- le couplage entre hydratation et conditions de cure ;
- les problèmes de transferts hydriques en cycles hydriques ;
- le couplage thermo-hygro-mécanique avec l'intégration des effets couplés de la température et de l'humidité sur les vitesses de fluage (et donc de relaxation des contraintes à l'origine de la fissuration, ceci incluant le problème du fluage de traction et les problèmes de fluage de dessiccation en température).

Ces problèmes fondamentaux se heurtent souvent à des lacunes "expérimentales", parmi lesquelles on peut citer :

- le fluage en température y compris avec dessiccation ;
- le fluage en traction et son couplage avec l'endommagement de traction ;
- les relaxations des contraintes au jeune âge ;
- l'analyse fine de la prise et des retraits empêchés ;

- ❑ le suivi en parallèle de cycles hydriques et retraits associés ;

Les modèles THM seront donc complétés d'essais permettant de les alimenter et d'essais de validation qui font l'objet de la partie suivante.

4.3. L'expérimentation

En ce qui concerne les structures modèles qui seront analysées, on peut distinguer d'une part les expérimentations antérieures au présent projet, dont les résultats sont accessibles immédiatement, et d'autre part les nouvelles expérimentations proposées dans le cadre du projet national.

Les retours d'expérience d'expérimentation sur ouvrages existants seront analysés (maquette d'essai d'enceinte en air et en vapeur MAEVA-EDF, comportement d'une paroi mince soumise à un gradient thermique-LCPC ; fissuration au jeune âge de voiles de 1,20 m d'épaisseur-galeries EDF, comportement thermohydrique d'un cylindre en béton-MAQBETH, fissuration d'aéroréfrigérant...).

Ces expérimentations existantes seront complétées par la réalisation d'essais sur un bloc à l'échelle 1 de grande dimension particulièrement instrumenté en utilisant toutes les méthodes les plus performantes dont les détails de mise en œuvre seront précisées au début du projet afin de répondre au mieux aux besoins conjoints de la réglementation et de la modélisation.

III - Fissuration sous chargement cyclique

Coordinateur Philippe Bisch, IOSIS – INDUSTRIES

1. La problématique

L'objet de cette partie est l'analyse de la réglementation et des pratiques d'ingénierie concernant la maîtrise de la fissuration de voiles en béton armé sous l'effet de chargements cycliques, notamment l'action sismique.

La prévision de la fissuration des voiles en béton armé est importante pour le bon fonctionnement et la durabilité des structures concernées. Dans un cadre normatif, cette prévision doit être faite vis-à-vis d'états limites, plus précisément :

- à l'état limite de service, car elle permet de maîtriser l'étanchéité ou le confinement des réservoirs ou ouvrages ayant des fonctions de même type. Il faut aussi limiter la fissuration pour des raisons esthétiques ou pour la durabilité des ouvrages.
- dans certaines circonstances, à l'état limite ultime (en situation sismique ou accidentelle), par exemple si on veut maintenir l'étanchéité d'un ouvrage après séisme ou encore limiter les ouvertures des fissures pour assurer la tenue des ancrages des équipements.

Pour ce faire, pour prendre le cas du séisme, il n'est pas suffisant de connaître l'état de fissuration en cours de chargement, il faut aussi le connaître une fois celui-ci terminé, car c'est cet état final qui détermine les performances ultérieures de l'ouvrage tant sur le plan mécanique que sur celui d'autres fonctionnalités (étanchéité, durabilité,...). Ceci pose la question de la part irréversible de la fissuration lorsqu'un ELU de ce type est atteint

Les formules développées par le CEB, puis dans le cadre de l'EUROCODE 2, apportent des solutions satisfaisantes (quoique toujours approximatives...) pour des poutres en flexion ou en traction, mais des études précédentes ont montré qu'elles n'étaient pas vraiment applicables à des voiles. Elles ne traitent par ailleurs que des situations de service en sollicitation quasi-statique.

Il s'agit, en s'appuyant sur les résultats expérimentaux disponibles ou à établir et sur les développements récents pour la modélisation du béton armé, d'établir des procédures simples pour évaluer écartement et ouvertures des fissures dans des situations de service ou ultimes, sous chargement dynamique cyclique.

2. Les objectifs

L'objectif général est double : a) améliorer la connaissance du phénomène et mettre à disposition des concepteurs des méthodes d'évaluation simples et fiables, b) améliorer l'économie de ce type de structures en permettant d'optimiser les quantités de béton et d'acier dans le cadre de fonctions à respecter.

2.1 Le point de vue des Maîtres d'ouvrages

La prévision de l'état de fissuration de voiles en béton armé a une influence directe sur le coût de la construction et permet de mieux appréhender le comportement des ouvrages.

Les ouvertures des fissures dépendent de l'état de sollicitation des voiles, de leurs épaisseurs et ferraillements et de la qualité des dispositions constructives. Dans le cadre d'un projet où les ouvertures des fissures doivent être limitées, l'optimisation des quantités à mettre en œuvre est à rechercher afin de minimiser le coût de la construction.

Une fissuration excessive en service affecte l'esthétisme, la durabilité et, dans le cas de certains ouvrages, leur fonctionnement. A l'état limite ultime en situation sismique ou accidentelle, une fissuration imparfaitement maîtrisée peut également compromettre certaines fonctions importantes assurées par les éléments structuraux (perte de confinement, rupture d'ancrages).

2.2 Le point de vue de l'ingénierie

L'objectif du projet est de mettre au point des méthodes de calcul destinées à l'ingénierie permettant la prévision de la fissuration. Des formules de calcul des ouvertures, de l'orientation et de l'espacement des fissures dans les voiles seront ainsi proposées pour les états limite de service et ultime, pour un chargement dynamique cyclique. Il est attendu des progrès sur les trois aspects suivants :

- ❑ Formules applicables pour des structures spéciales telles que des voiles, l'Eurocode 2 ne fournissant pas une méthode satisfaisante à cet égard.
- ❑ Considération du caractère dynamique cyclique du chargement.
- ❑ Evaluation de la fissuration à l'ELU accidentel ou sismique.

Par ailleurs, un objectif de l'ingénierie est de mettre au point des méthodes de calcul (type post-processeur d'un modèle éléments finis) permettant une estimation plus fine (état de fissuration, ouverture et espacement de fissures, déformations des armatures, ...), tout en restant dans le cadre des pratiques d'ingénierie.

2.3 Le point de vue des chercheurs

Le déroulement du programme envisagé pour ce projet permettra les développements suivants :

- ❑ le développement d'essais innovants avec caractérisation fine des conditions aux limites et mesure 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 de la corrélation d'images pour la caractérisation de la fissuration et de ses effets mécaniques sur les armatures ;
- ❑ le développement d'une base de données sur la fissuration des voiles obtenue par une campagne d'essais numériques.

3. Etat de l'art

Du fait de sa complexité, la caractérisation de la résistance et du comportement à rupture des voiles en béton armé en situation sismique a fait l'objet de nombreuses études expérimentales aussi bien au niveau national qu'international. Différents programmes de recherche français (CAMUS 1 & 2) et européen (CAMUS 3 & 4, ICONS, ECOLEADER, ECOEST) ont permis d'obtenir une base de données en dynamique comme en statique du comportement global à rupture de murs plutôt élancés et peu armés, correspondant à du bâti courant.

Concernant les voiles plus armés, d'utilisation plus orientée vers l'industrie, les résultats les plus marquants concernant les murs à faible élancement sous sollicitations membranaires sont issus des programmes suivants :

- ❑ NUPEC: cette campagne d'essais (NUPEC, Japon, 1993) concernait des voiles faiblement élancés (dimensions utiles : 3,00 m x 2,00 m pour 7,5 cm d'épaisseur) sollicités par un chargement alterné. Cette campagne avait pour but de valider le dimensionnement des voiles et a fait l'objet d'un benchmark international de comparaison de modèles de comportement.
- ❑ SAFE: cette campagne d'essais (COGEMA – EDF SEPTEN, réalisée à ISPRA, 1998) concernait des essais pseudo-dynamiques sur des voiles en béton armé faiblement élancés (dimensions utiles : 2,60 m x 1,20 m pour 16 et 20 cm d'épaisseur) et fortement armés, soumis à des sollicitations alternées de cisaillement. L'objectif était de préciser les marges inhérentes à la pratique nucléaire.
- ❑ Test CEBTP (2002): cette étude concernait des voiles en béton armé avec trois différents taux d'armatures : 0,3%, 0,5% et 0,8% (dimensions utiles : 1,50 m x 0,75 m pour 10 cm d'épaisseur). Ces voiles normalement armés étaient sollicités en cisaillement alterné.

Des études ont été menées sous la direction d'EDF sur ces sujets, elles ont permis d'analyser les résultats expérimentaux accessibles. Néanmoins, les résultats concernant la fissuration sont peu nombreux (notamment pour des raisons d'instrumentation) et rarement disponibles sous forme numérique, nécessaire pour une étude fine. Cependant, l'expérimentation SAFE a mis à disposition ce type de résultats sous forme adéquate, ce qui a permis une première approche du problème posé, pour la famille de murs testée évidemment en petit nombre.

Au niveau international, des essais originaux ont été développés sur des éléments de structures en cisaillement (Vecchio & Collins 1986) permettant de définir des règles de calcul simples sur la rupture d'éléments structuraux en cisaillement pur.

Ces différents programmes ont permis de mieux comprendre les mécanismes de rupture de ces voiles, de connaître l'évolution de leurs caractéristiques dynamiques en fonction de l'endommagement, de valider des modèles. Pourtant, ils ne permettent pas de mettre en place des règles les plus universelles possibles permettant de connaître le mode de fissuration, l'ouverture et l'espacement des fissures dans les voiles. La raison principale est que le béton lui-même participe à la résistance au cisaillement (formulations actuelles basées sur la contrainte dans les armatures). Par ailleurs, chaque essai était réalisé sur un seul type de géométrie, avec des conditions aux limites et des chargements particuliers difficilement extrapolables. On peut énumérer quelques limites de ces programmes :

- ❑ La géométrie des essais et les conditions de chargement ne sont pas représentatives d'une structure réelle.
- ❑ Les conditions aux limites sont complexes et difficiles à modéliser par manque d'informations précises (un encastrement n'est jamais parfait), ce qui amène des différences de comportement calcul/essai dès le domaine élastique.
- ❑ Les informations obtenues sont globales (déplacements en tête, force globale, description macroscopique de la fissuration...) et n'apportent pas d'informations fines sur la ruine. Les mesures locales obtenues par des extensomètres ne sont pertinentes que si le phénomène que l'on souhaite enregistrer (localisation des déformations, ouverture de fissure) se produit exactement sur la zone d'étude et perpendiculairement à la direction de mesure, ce qui reste aléatoire.
- ❑ Les essais dynamiques sur table vibrante empêchent la réalisation de mesures physiques fines nécessaires au suivi de la fissuration telles que les mesures de champs de déplacements ou de déformations. Seuls des informations globales (déplacement ou accélération en un point donné de la structure) sont accessibles à la mesure. Des essais sur mur de réaction permettent de surmonter en grande partie ces limitations.

4. Méthodologie

4.1. Philosophie générale de la recherche

Afin de permettre une avancée significative par des résultats utilisables dans les projets, il est proposé une recherche alliant expérimentation sur corps d'épreuve et expérimentation numérique. Cette démarche est décrite au § 3.2 de la colonne « expérimentation ».

Pour l'étude du comportement pendant et après séisme, l'aspect dynamique de la sollicitation n'apporte pas d'information supplémentaire lorsqu'on s'intéresse à un seul panneau de mur, si un comportement structurel d'ensemble n'est pas en jeu. Pour une meilleure connaissance comportementale semi locale, des essais quasi statiques cycliques sur des panneaux de murs sont suffisants, la vitesse de déformation lors d'un séisme étant trop lente pour influencer notablement les comportements locaux ou semi locaux.

4.2. Méthode

La démarche innovante que nous proposons repose sur les étapes suivantes :

1. Il sera nécessaire, dans un premier temps, de cerner plus précisément les situations réelles rencontrées par les concepteurs dans les situations concernées par ce thème pour définir le programme d'expérimentation numérique à mettre en œuvre, donc, en amont, les tests devant servir de support.
2. Montage d'une expérimentation comprenant des tests monotones et/ou cycliques sur des panneaux représentatifs, incluant une recherche des meilleures méthodes d'instrumentation des fissures. Les essais envisagés bénéficieront **des avancées majeures effectuées ces dernières années sur les moyens de mesures**, en particulier les techniques de corrélation d'images. Les informations qui peuvent être obtenues sont particulièrement déterminantes sur plusieurs points :
 - ❑ Les conditions aux limites réelles peuvent être analysées (déplacement et rotation d'un encastrement, déformation d'un mur de réaction) et permettent d'obtenir les conditions aux limites réelles pour la simulation.
 - ❑ Des essais statiques et pseudo-dynamiques permettent de prendre en compte des conditions aux limites réalistes et un environnement « dynamique » du chargement tout en bénéficiant des possibilités de mesures en statique.
 - ❑ La fissuration peut être localisée précisément dès son apparition, et suivie tout au long de l'essai.
3. Réalisation d'essais simples sur des volumes élémentaires représentatifs, avec les techniques actuelles de mesure permettant une connaissance précise des conditions aux limites réelles.
4. Utilisation et validation de modèles fins (macro et micro) par les essais.
5. Mise au point d'un modèle numérique fin (macro et micro) de panneau en béton armé calé sur les essais d'éprouvettes à petite échelle puis confronté aux résultats de l'expérimentation à plus grande échelle.
6. Définition des classes de murs à étudier par expérimentation numérique sur un grand nombre de cas, en relation avec 1).
7. Définition d'une méthode d'ingénierie pour la prévision des espacements et des ouvertures des fissures sur la base de l'exploitation des résultats expérimentaux et numériques.

IV – Modélisation : synthèse colonne 1

Coordinateur Christian LA BORDERIE

1. Introduction

La fissuration des structures en béton est la conséquence des actions combinées des sollicitations d'origine thermique, hydrique, mécanique et chimique. La détermination de la position des fissures et de leurs ouvertures est nécessaire pour quantifier la durabilité de la structure étudiée. Le programme proposé se concentrera sur la création de fissures « macroscopiques » dont l'ouverture est supérieure ou égale à 0,1 mm.

Les actions proposées dans le cadre de la modélisation sont déclinées en trois chantiers intimement liés.

2. Organisation en chantiers

Le premier chantier : « modélisation de la fissuration sous chargement statique monotone » s'intéresse aux effets instantanés des actions mécaniques monotones sur les structures. (cf. Chantier 1.1).

Les modèles de mécanique ont été construits pour représenter les effets mécaniques de la fissuration. La relation contrainte-déformation est calculée en tenant compte par l'intermédiaire de variables internes de la présence de fissures dans le béton, mais la géométrie et la position des fissures n'est qu'indirectement représentée par son action sur les variables mécaniques. Les activités de ce chantier permettront de dégager les méthodes qui permettent de déduire la présence et l'ouverture de macrofissures à partir de l'état (décrit par les variables d'état et les variables internes) de la matière. Ces méthodes seront basées sur des modèles déjà développés et validés dans les différents laboratoires partenaires.

Le second chantier : « Modélisation du comportement thermo-hydro-mécanique du béton » (cf. Chantier 2.1). Le calcul THM des ouvrages en béton repose avant tout sur une bonne connaissance du comportement intrinsèque du béton. On distingue à ce niveau le comportement thermique, le comportement hydrique et le comportement mécanique. Le comportement chimique apparaît quant à lui principalement au jeune âge via ses conséquences thermiques (exothermie de la réaction d'hydratation), hydriques (auto-dessiccation) et mécaniques (évolution des propriétés mécaniques et retrait endogène chimique). Les conséquences de ce comportement peuvent toutefois être quasi-permanentes en raison des systèmes d'auto-contraintes issues d'une hydratation non homogène dans les pièces massives ou de conditions aux limites particulières. Les actions hydriques peuvent être de deux natures : surpression ou dépression conduisant à des comportements très différents non seulement en terme d'endommagement mais aussi en terme de vitesse de fluage, le calcul des pressions étant lui-même un problème non linéaire nécessitant une bonne connaissance du matériau (isothermes, perméabilité...). Enfin l'action thermique, outre une dilatation, entraîne une modification du comportement de l'ouvrage (accroissement de la vitesse de fluage, modification des propriétés physiques à haute température).

Le troisième chantier « modélisation de la fissuration sous chargement cyclique » (cf. Chantier 1.3).

La problématique est exactement la même que celle posée dans le chantier 1.1 avec un degré de complexité plus élevé par la prise en compte de sollicitations cycliques. Ce type de sollicitation rend nécessaire la prise en compte des effets unilatéraux liés à la re-fermeture de fissures et éventuellement des phénomènes liés au glissement entre les lèvres des fissures.

Les méthodes de limitation de la localisation qui sont nécessaires à l'obtention de simulations dans le domaine non linéaire adoucissant et pour le lien avec les ouvertures de fissures ne sont pas toutes applicables, d'autre part les expériences disponibles sont souvent effectuées dans le domaine monotone.

Les activités de cet chantier se focaliseront, au-delà de la création des fissures, sur le problème du comportement cyclique d'une structure fissurée, y compris sous compressions excessives: effet unilatéral provoqué par la respiration des fissures, plastification des armatures,....

Les trois chantiers se baseront en premier lieu sur des résultats expérimentaux existants. Malheureusement, peu de résultats sont disponibles sur la fissuration proprement dite et sur les ouvertures de fissures et certaines expériences de laboratoire devront

sûrement être réalisées afin de préciser les modèles. Une harmonisation entre les besoins des différents chantiers sera nécessaire afin d'optimiser le nombre d'expériences de laboratoire nécessaires. Pour chaque nouvelle expérience, une attention particulière sera portée sur la détection de la fissuration et la mesure des ouvertures de fissures.

Un travail sur le comportement de la liaison acier-béton sera réalisé en parallèle par différents partenaires.

Dans un second temps, les méthodes développées dans le premier chantier seront adaptées aux modèles THM et aux cas des chargements cycliques.

Finalement, les différentes méthodes seront validées sur les expériences à grande échelle.

Les activités de modélisation devront se terminer 3 ans après le début du projet afin que les méthodes établies puissent être déclinées au niveau réglementaire.

3. Actions proposées

Lot 0 : participation à la définition des programmes expérimentaux des colonnes 2 et 4. (Comité de Pilotage Modélisation = coordinateurs des chantiers).

Lot 1 : pour tous les chantiers:

- Tâche 1 : définition de benchmarks de réflexion (Comité de Pilotage Modélisation = coordinateurs des chantiers).
- Tâche 2 : validation et calibration des méthodes proposées, calibration sur les expériences existantes (tous partenaires). Livrable : résultat du benchmark.
- Tâche 3 : bilan des besoins en expériences de laboratoire (Comité de pilotage Modélisation).

Ces trois tâches sont traitées par cas de charge et renvoient aux chantiers **1.1, 1.2, 1.3**.

Participation au groupe de réflexion tâche 3 colonne réglementation.

Lot 2 :

- réalisation des expériences de laboratoire (3 laboratoires opérationnels). Livrable : rapports d'essais détaillés.
- calibration des modèles (partenaires de la tâche 2).

Lot 3 :

- homogénéisation et adaptation des méthodes à l'ensemble des cas de chargements envisagés (tous les chantiers, tous les partenaires). Livrable : publication en revue scientifique.
- Validation sur essais à grande échelle. (tous les chantiers, tous partenaires, en lien étroit avec la colonne expérimentation). Livrable : participation à l'élaboration du rapport final commun aux 3 colonnes.

Ces deux tâches sont traitées et renvoient aux chantiers **1.1, 1.2, 1.3**.

Lot 4 : réalisation des expérimentations numériques suivant spécification colonne 3 (réglementation). Livrable : résultats bruts, données d'entrée colonne réglementation tâche 4. Il contient a minima une étude de sensibilité des paramètres caractéristiques des modèles développés et leur influence sur le développement et la propagation de la fissuration. Néanmoins, on pourra aussi y inclure d'autres aspects. En particulier des méthodes d'éléments finis stochastiques pourront être testées et adaptées à des modèles numériques de type endommagement non local afin d'étudier l'influence de la variabilité des paramètres d'entrée (géométrie, ferrailage, lois de comportement, effets thermiques) sur des paramètres de sortie (ouverture de fissure, efforts résistants...)

Lot 5 : méthode simplifiée intermédiaire basée sur les calculs éléments finis (Comité de pilotage modélisation + partenaires proches du milieu industriel + comité de pilotage colonne 3, réglementation). Livrable : Modules et/ou méthodes de calcul.

Lot 6 : travail collaboratif sur les aspects réglementaires (en coordination avec les tâches 4 et 5 de la colonne 3, réglementation).

Le travail de modélisation et expérimentation à froid et à chaud sur la liaison acier-béton devra se faire en parallèle des chantiers durant les deux premières années.

Chaque lot pourra faire l'objet d'une publication dans une revue ou un congrès adaptés.

4. Méthode de travail et organisation

4.1 Chantier 1.1

Dans ce chantier on peut dès à présent proposer différentes méthodes

Post traitement d'une approche continue :

On se positionne dans le cas où on utilise un modèle macroscopique (endommagement, plasticité) existant et utilisé conjointement à une méthode de régularisation (Hillerborg, Visco-endommagement, Second gradient ou Non local suivant les partenaires). L'utilisation de ces méthodes permet de décrire correctement l'évolution des caractéristiques mécaniques des structures ainsi que les positions des zones dans lesquelles se passent les non-linéarités. La méthode de régularisation introduit une longueur caractéristique qui devrait permettre de remonter à l'ouverture de fissure lors d'une opération de post traitement.

Approches discrètes ou mixtes continu-discret :

Ces approches ont pour vocation de permettre une évaluation directe des positions et des ouvertures de fissures (X-FEM, Levelsets, calcul couplé et modèle à ouverture de fissures). Elles ont atteint un degré de maturité moins important que les précédentes mais offrent plus de possibilités concernant les couplages.

4.2 Chantier 1.2

Pour répondre à la problématique industrielle concernant l'élaboration de règles de dimensionnement performantes, la démarche proposée dans ce projet consiste à s'appuyer sur des résultats d'analyses numériques fines appliquées à des structures modèles instrumentées. Différents modèles et les moyens expérimentaux des différentes équipes du projet seront utilisés pour réaliser ces analyses. Les modèles numériques utilisés sont tous basés sur des formulations aux éléments finis ; ils intègrent les phénomènes non linéaires (endommagement, plasticité, fluage...) au niveau constitutif et parfois également à l'aide d'éléments d'interface entre les éléments finis. Outre le comportement THM non linéaire court terme, certains considèrent avec attention les phénomènes de déformations différées et les phénomènes liés à l'hydratation. Les calculs seront orientés afin de répondre aux questions posées par la réglementation.

A l'exception d'une proposition faite par un des partenaires, l'ensemble des partenaires utilise une approche exclusivement continue. Afin de déterminer les ouvertures de fissures, un travail commun avec les acteurs du chantier 1.1 sera nécessaire pour intégrer et coupler les approches.

4.3 Chantier 1.3

Les travaux de ce chantier seront les mêmes que ceux du 1.1 (la description du comportement sous chargement monotone est un pré-requis nécessaire à celle du comportement sous chargement cyclique), en utilisant des modèles de comportement et de régularisation adaptés. Compte tenu du manque de résultats expérimentaux disponibles dans ce domaine, la réflexion sur les expériences de laboratoire à réaliser devra débuter au début du projet. Ces expériences permettront de préciser la meilleure manière de modéliser les effets unilatéraux (changement de signe de la contrainte, déformation ou autre méthode) et de caler précisément les paramètres des modèles.

4.4. Organisation

Un comité de pilotage spécifique aux actions de modélisation s'assurera de l'avancement des lots et de la cohérence des recherches effectuées dans les 3 chantiers.

Comité de pilotage Modélisation : coordinateurs des chantiers 1.1, 1.2 et 1.3 détaillés ci-après. Une réunion tous les mois sur la durée du projet.

Réunion générale : 8 jours sur la durée du projet (4 x ½ journée par an), tous les partenaires.

Réunion publique, tous les partenaires sur un congrès ou une journée spécifique.

5. Livrables:

Un certain nombre d'actions donneront lieu à un rapport :

- Lot 1.2 : résultat des simulations des différents partenaires sur le benchmark
- Lot 2.1 : rapport d'essais

- Lot 3.1 : Rapport sur les méthodes numériques proposées par le groupe modélisation.
- Lot 4.1 : Résultats bruts des simulations numériques
- Lot 5 : Rapport : proposition de méthodes simplifiées, boite à outils et modules de calculs si disponible.
- Lot 6 : Participation au rapport final.

V – Expérimentation : synthèse colonne 2

Coordinateur Louis DEMILECAMPS

1. Introduction

Il est nécessaire de valider les nouvelles méthodes d'ingénierie et de modélisation numérique en les confrontant à des résultats d'essais représentatifs du comportement des ouvrages spéciaux. Par ailleurs, ce type d'essai, dont les conditions sont mieux contrôlées ou connues que celles des ouvrages réels, permet de mieux appréhender l'influence des principaux paramètres (armatures, béton, etc.) sur le nombre, l'ouverture et la profondeur des fissures, ainsi que leur évolution dans le temps.

Les données nécessaires à la validation des modèles numériques et à la définition de domaine d'utilisation des formules d'ingénierie seront recherchées parmi :

- ❑ les données disponibles provenant d'expérimentations antérieures et mises en commun par les partenaires du projet,
- ❑ les expérimentations réalisées dans le cadre du projet
- ❑ des mesures sur ouvrages existants.

2. Données déjà disponibles

Les informations sur les résultats d'essais déjà disponibles font l'objet de l'annexe 2. Elles concernent des structures soumises à des chargements statiques et thermiques, des structures conçues pour étudier le comportement au jeune âge ainsi que des voiles soumis à des chargements cycliques.

Concernant les essais en laboratoire ou sur chantier, plusieurs séries d'essais ont été effectuées pour le problème de l'ouverture des fissures du béton armé parmi lesquelles on peut citer :

- ❑ Les essais sur des poutres en flexion du LERGEC-IUT de Strasbourg et leur interprétation effectuée par le LERMES (béton ordinaire), avec le financement d'EDF.
- ❑ Les essais de l'EPFL (Mivelaz) sur des tirants en béton armé (B courant et BHP).
- ❑ Les essais de la maquette MAEVA (BHP), durant lesquels une fissuration au bétonnage, des fissurations sous gradient thermique et des fissurations sous pression ont pu être observées.
- ❑ Les essais de comportement d'une paroi mince soumise à un gradient thermique (Béton courant et BHP EDF - LCPC).
- ❑ La réalisation de voiles d'épaisseur 1,20 m avec deux types de béton pour étudier la fissuration au jeune âge (Galeries sur site EDF).
- ❑ Comportement thermohydrrique d'un cylindre BHP (Maquette MAQBETH, CEA).
- ❑ Poutres en cycle hydrique, thèse de S. Multon, LCPC.
- ❑ Fondation des piles du pont de Millau (Eiffage, SITES).

Un premier examen de ces différents cas sera effectué pour s'assurer que toutes les données nécessaires à une analyse dans le cadre de CEOS.fr sont ou non disponibles.

- ❑ Les essais de cisaillement de voile SAFE (EDF, ISPRA, AREVA).

Tout ou partie de ces essais sera exploitée par les ingénieurs et les chercheurs impliqués dans le projet pour évaluer les capacités prédictives des méthodes actuellement proposées pour traiter de la fissuration. On appliquera soit des formules à caractère plus ou moins réglementaire ou des modèles numériques de complexité croissante. Cette première tâche fournira une référence initiale des performances des outils actuels et permettra de mesurer les progrès accomplis à la fin du Projet.

3. Essais propres au projet CEOSFR

3.1. Principes directeurs du programme d'expérimentation spécifique

Ainsi que cela a été mentionné au chapitre "Présentation générale", paragraphe 4 "Philosophie générale de la recherche", l'objectif prioritaire du programme d'expérimentation n'est pas de fournir de nouvelles observations relatives aux mécanismes de fissuration, mais des jeux de données complets, précis et fiables pour permettre de "caler" et valider des modèles numériques scientifiques en vue d'accéder à la possibilité d'élargir l'acquisition des données grâce à l'expérimentation virtuelle. Le programme expérimental physique comprend donc deux stades :

- une série d'expérimentations et d'essais à petite échelle, portant essentiellement sur l'acquisition de données relatives aux matériaux, directement destinée à l'amélioration des modèles utilisés. Ces essais sont définis et pilotés par les équipes de modélisation pour leurs besoins propres ;
- une série d'expérimentations et d'essais conduits sur des corps d'épreuve de grandes dimensions, de façon à minimiser l'incidence des effets des différentes échelles. Dans ce second programme, la définition des corps d'épreuve et programmes de sollicitation a été faite de façon à ce que la géométrie et les conditions de chargement n'introduisent pas par eux-mêmes de complexité au niveau de la modélisation. De même, les phénomènes attendus et les observations à réaliser sont supposés ne pas apporter par eux-mêmes de difficulté d'interprétation. Ainsi les modélisateurs pourront-ils se concentrer sur la partie scientifique de leur modélisation.

En revanche, une attention exceptionnelle sera portée à l'acquisition de toutes les données pertinentes nécessaires à la modélisation d'une part, à l'interprétation des résultats de celle-ci d'autre part. Ainsi, un maximum d'informations relatives aux corps d'épreuve seront-elles rassemblées dès le départ : géométrie des différents éléments ; caractéristiques mécaniques, physiques et rhéologiques des différents matériaux ; conditions de fabrication et de maturation des corps d'épreuve jusqu'à leur utilisation.

Relativement peu nombreux du fait de leur taille et des difficultés de chargement mécanique, ces corps d'épreuve devront être instrumentés pour pouvoir apporter des données pour chacun des thèmes techniques retenus dans le cadre du projet CEOS.fr. Il est donc prévu de les instrumenter en ayant recours à des technologies de mesure redondantes : mesures de déformations locales sur bases courtes et bases longues, mesures de déformation d'ensemble par corrélation d'images, suivi des mécanismes internes de fissuration par détection des émissions acoustiques. Il est prévu de disposer ainsi de toutes les données identifiées a priori comme étant nécessaires à l'analyse des modélisations, mais aussi de données "de réserve" pouvant permettre une révision des modèles. Le programme définitif d'expérimentation sera finalisé avec les équipes de modélisation et l'expérimentation elle-même conduite en co-pilotage permanent avec celles-ci.

3.2 Définition des corps d'épreuve

- Essais d'identification sur éprouvettes : s'ils sont liés directement aux données d'entrée des modèles, ils seront définis par les équipes impliquées dans les calculs d'ingénierie et la modélisation numérique. Par exemple, l'identification des caractéristiques thermiques du béton sera établie à partir d'essais de matériaux (mesures sur éprouvettes pour différents taux d'humidité). Les laboratoires impliqués dans la réalisation des maquettes à échelle réduite participeront à ces essais,
- Essais destinés aux thèmes 1 – Chargement statique monotone et 2 – Gradient THM, dans une moindre mesure au thème 3 – Chargement cyclique.

Une série de corps d'épreuve de géométrie simple (parallélépipèdes 5 m x 2 m x 1 m environ), armés également de façon simple et facilement modélisables, seront réalisés selon un programme permettant de tester de façon plus ou moins découplée le comportement de ces pièces vis-à-vis de différents paramètres.

Ces corps d'épreuve seront soumis à leur évolution naturelle ou assistée pour leur comportement THM, et à des programmes de chargements mécaniques (*a priori* par flexion simple, mais aussi potentiellement mis en condition de retrait gêné ou de chargement thermique externe). Aucune dalle d'essai des laboratoires partenaires n'étant en mesure de permettre le chargement de corps d'épreuve de cette dimension, la réalisation d'une dalle spécifique sur le site d'un des partenaires industriels a été prévue. Les équipes de suivi et de mesure se déplaceront sur ce site.

Les données expérimentales recueillies seront confrontées à celles qui seront issues des expérimentations numériques menées en parallèle.

A titre indicatif, dix corps d'épreuve (blocs) sont envisagés :

- bloc de référence : béton de référence, ferrailage de référence (pourcentage et diamètre),
- béton de référence, ferrailage pourcentage réduit, diamètre identique,
- béton de référence, ferrailage pourcentage identique, diamètre réduit,
- béton de référence, changement disposition de ferrailage,
- ferrailage de référence, béton différent (résistance en traction),
- béton de référence, ferrailage de référence, reprise de bétonnage,
- béton et ferrailage de référence, reprise de bétonnage, modification des aciers de couture,
- trois blocs permettant d'évaluer au choix l'incidence :
 - de la variabilité d'un bloc à l'autre,
 - d'une précontrainte longitudinale,
 - d'un chargement mécanique différent,
 - d'un chargement cyclique,
 - d'un chargement thermique sur une face,
 - de conditions aux limites imposant un retrait gêné,
 - d'un défaut local contrôlé.

Parallèlement à ce programme d'essais sur corps d'épreuve de grande taille, sera conduit un programme d'essais destiné à évaluer l'incidence de l'effet d'échelle sur les observations réalisées sur des corps d'épreuve à échelle réduite. La référence sera le bloc de référence défini ci-dessus et l'échelle retenue pour les dimensions extérieures sera celle du tiers.

Sur cette base, des corps d'épreuve seront réalisés en respectant différentes règles de similitude : taille des granulats, section des aciers, diamètre des aciers, capacité résistante. Ces blocs seront testés en laboratoire.

Nota : étant donné la taille des blocs, l'effet de la dessiccation devrait être très faible sur la durée du projet. Une réflexion sera menée en cours de projet sur l'opportunité de mettre en place un dispositif parallèle permettant de réaliser des mesures sur une période plus longue.

- Essais destinés au thème 3 – Chargement cyclique et, dans une moindre mesure, aux thèmes 1 et 2.

Développement d'un dispositif permettant de solliciter un voile de béton armé construit à l'échelle 1/3, étudié sous l'action de sollicitations alternées croissantes appliquées dans son plan jusqu'à la stabilisation du réseau de fissuration. Ce type d'essai, compte tenu des efforts considérables qu'il engendre, nécessite des moyens importants.

Afin de permettre une avancée significative par des résultats utilisables dans les projets, il est là aussi proposé une recherche alliant expérimentation sur corps d'épreuve et expérimentation numérique.

En effet, l'expérimentation sur maquette se heurte à un certain nombre de difficultés : les expérimentations précédentes ont montré qu'il est difficile de descendre en dessous d'une échelle 1/3 si on veut avoir un micro béton représentatif et surtout des armatures existant dans le commerce, si possible avec une ductilité suffisante. De tels corps d'épreuve, armés à l'échelle, ont une résistance importante pour les sollicitations dans leur plan, de l'ordre de plusieurs MN à l'effort tranchant, ce qui pose des problèmes de vérinage et d'ancrage. Peu d'installations en France et même en Europe sont en mesure de mettre en œuvre de tels moyens. Il est donc peu envisageable d'essayer un nombre de corps d'épreuve suffisant pour obtenir une formulation fiable permettant de couvrir un domaine de caractéristiques de murs suffisamment large.

D'où l'idée proposée ici de coupler expérimentation numérique et expérimentation sur maquettes afin de permettre, par le calcul, de couvrir un champ suffisamment large.

Une autre difficulté de l'expérimentation physique réside dans la mesure elle-même, qui se rapporte à l'espacement et à l'ouverture des fissures ; les fissures n'étant pas localisées *a priori*, la pose d'extensomètres en petit nombre n'est pas envisageable. Il est donc nécessaire de mettre au point une méthode permettant cette mesure de façon sûre. Une méthode par triangulation d'extensomètres est prévue et sera complétée par des méthodes optiques par corrélation d'images.

3.3 Essais sur ouvrages de référence

En fonction des opportunités, des ouvrages existants ou en construction pourront être utilisés pour des expérimentations.

3.4 Instrumentation envisagée

Pour de tels essais, l'instrumentation revêt un caractère primordial puisqu'on recherche la localisation, l'ouverture et la profondeur des fissures.

L'instrumentation, dans le cadre d'un tel projet, ne vise pas la mise au point de nouvelles approches technologiques dans le domaine des capteurs mais sera orientée vers la mise en œuvre de technologies éprouvées devant servir exhaustivement les besoins. La quantification exhaustive des facteurs d'influence et la recherche de haute précision dans les mesures métrologiques sur ouvrages et maquettes seront prises en compte et validées en amont des expérimentations par les simulations. De même, la topologie de l'implantation des capteurs sera étudiée pour appréhender au mieux les caractéristiques géométriques et le lieu d'apparition des fissures dans un référentiel tridimensionnel. Pour cela, on prévoit à minima de mesurer des contraintes locales, des déformations sur des bases de longueur adaptée à l'échelle des maquettes, de nombreuses températures, de l'hygrométrie, et ce en surface et à cœur des structures. Pour les instrumentations "à cœur", l'instrumentation sera conçue pour appréhender le comportement au jeune âge et l'initialisation des mesures de déformation, et devra traiter séparément les armatures du matériau béton. Les capteurs devront avoir une intrusivité limitée et/ou être intégrés dans la modélisation. Des relevés visuels objectifs d'apparition des fissures seront également menés, aidés par la mise en œuvre de techniques micro ou macroscopiques, de ressuage ou de thermographie, ainsi que d'analyse d'images.

- En outre, seront relevés plusieurs paramètres exogènes des sites d'expérimentation :
 - mesure en continu de la température ambiante en deux points, de l'hygrométrie,
 - pour les ouvrages en extérieur, mesure de l'ensoleillement et de la pluviométrie.
- Pour le suivi au jeune âge :
 - au moins un couple de capteurs rigides pour suivi au jeune âge,
 - un système d'acquisition automatique à une cadence d'enregistrement appropriée en fonction du temps.

4. Livrables

Rapports détaillés des résultats des expérimentations et interprétations de ceux-ci.

VI – Réglementation et pratique d'ingénierie : synthèse colonne 3

Coordinateur Jacques CORTADE

1. Introduction

L'objet du PN CEOS.fr est, sur les phénomènes de fissuration des structures en béton, d'acquérir une connaissance théorique, basée sur l'expérimentation et la modélisation numérique, suffisante pour permettre notamment de :

- mettre au point et proposer des outils d'ingénierie assez simples pour être utilisés par les professionnels des études de Génie Civil,
- valider le domaine d'application des Règlements existants et proposer des règles et des méthodes d'ingénierie pour les ouvrages sortant du domaine d'application des règlements et pratiques existantes.

La présente section est consacrée à la présentation des tâches liées aux problèmes de l'ingénierie, notamment les modélisations à mettre en œuvre dans le cadre des projets par les bureaux d'étude et les règles et méthodes de calcul de la fissuration à insérer dans des textes de nature normative ou des règles de l'art.

2. Objectifs en termes d'ingénierie et de normalisation

Les documents ayant servi de base aux différentes parties des Eurocodes devront être analysés, ainsi que le code modèle FIP-CEB (y compris ses évolutions de 1978 à 1990) et les documents étrangers traitant du sujet (ACI 207 béton de masse, ACI 209 retrait et fluage, ACI 224 fissuration, ACI318 structures en béton, dont les chapitres relatifs à la fissuration ont été réécrits récemment,...). De même les thèses ou publications sur ces thèmes seront examinées.

Pour les déformations gênées, peu de documents à caractère réglementaire ou normatif traitent de ces sujets globalement. Les éléments normatifs sont répartis dans différents documents dont les limites de validité ne sont pas explicites et pas forcément cohérentes (EN1992-1-2 pour les caractéristiques thermiques du béton vis-à-vis du feu, EN1992-3 pour l'estimation des déformations gênées, EN1992-1-1 ou 1992-2 pour l'estimation des déformations de retrait et fluage,...).

Les pratiques d'ingénierie actuelles restent empiriques et disparates. Elles s'appuient sur quelques éléments de la réglementation permettant d'estimer les lois contraintes-déformations ou effort-déplacements pour justifier la résistance, et/ou sur des règles de ferrailage minimal.

Les retours d'expérience d'ouvrages existants devront être analysés (maquette d'essai d'enceinte en air et en vapeur MAEVA-EDF, comportement d'une paroi mince soumise à un gradient thermique-LCPC ; fissuration au jeune âge de voiles de 1,20 m d'épaisseur-galeries EDF, comportement thermo-hydrrique d'un cylindre en béton-MAQBETH, fissuration d'aéroréfrigérant...), au regard des méthodes et formules existantes.

Les documents de référence ou à caractère normatif (manuels du CEB, BAEL ou Eurocode 2) ne traitent pas de fissuration en sollicitation cyclique, surtout en situation accidentelle ou sismique.

La fissuration peut être provoquée par trois types de chargements, qui nécessitent des analyses et des connaissances différentes. Nous allons donc aborder ces trois chargements séparément, du point de vue de la normalisation.

2.1 Chargements statiques monotones.

Les avancées attendues concernent les limites de validité des méthodes et formules existantes et l'établissement de formules et méthodes pour les structures sortant de ces limites, c'est-à-dire les ouvrages de grandes dimensions.

2.2 Déformations imposées.

L'état de contrainte dépend de la façon dont les déformations sont gênées (dalle sur le sol, levée de bétonnage sur un béton plus ancien, dalle coincée entre des voiles massifs...). Ceci devra être plus détaillé que dans l'Eurocode 2.

L'estimation de la répartition des déformations dans la pièce de béton qui dépend des caractéristiques thermiques du béton et de l'évolution de l'humidité du béton, est une difficulté qui n'est pas considéré dans l'EN1992-1-1.

Enfin, dans le cas de pièces épaisses, l'état de contrainte d'origine mécanique est souvent faible et les contraintes dues aux déformations imposées peuvent devenir prépondérantes sans que les tractions soient très fortes par rapport à la résistance du béton. Il en résulte une fissuration qui n'est pas toujours systématique et l'application de l'EN1992-1-1 avec des enrobages et des diamètres d'aciers relativement forts conduit à des valeurs d'ouverture de fissures excessives par rapport à ce qui peut être mesuré sur site ou sur maquette.

Le but du projet est de prendre en compte dans la normalisation et les pratiques d'ingénierie ces phénomènes peu étudiés aujourd'hui.

2.3 Chargements cycliques, notamment l'action sismique.

La réglementation et les pratiques d'ingénierie concernant la maîtrise de la fissuration de murs en béton armé sous ces effets seront analysées.

Les problématiques auxquelles on s'intéresse ici sont de deux types : a) les effets liés au caractère dynamique cyclique de la sollicitation, qui peut se produire sous les effets du vent, d'un séisme, de vibrations de machine... b) le niveau élevé de la sollicitation, comparable à un ELU accidentel, par exemple pour le niveau de séisme de dimensionnement.

Les formules développées par le CEB, puis dans le cadre de l'EUROCODE 2, apportent des solutions satisfaisantes (quoique toujours approximatives...) pour des poutres en flexion ou en traction, mais des études précédentes ont montré qu'elles n'étaient pas vraiment applicables à des voiles. Elles correspondent généralement à des chargements quasi-statiques ou à des déformations imposées et ne traitent par ailleurs que des situations de service.

Cette partie de projet national a pour objet de proposer des procédures simples pour évaluer écartement et ouvertures des fissures dans des situations de sollicitation cyclique, de service ou ultimes.

3. Besoins en connaissance – Recherche et expérimentations nécessaires

3.1 Chargement statique monotone

Quatre besoins se font sentir concernant la fissuration sous charges statiques monotones :

1. Etablir le domaine de validité des méthodes actuelles exposées dans les divers règlements et leur pertinence.

En plus des domaines de validité, la pertinence des deux formules permettant de calculer l'espacement des fissures en fonction de l'enrobage, de la dimension du tirant équivalent en flexion et du diamètre des armatures, avec comparaison des diverses formules existantes sera étudiée. Il en sera de même pour la limitation de la différence d'allongement acier-béton prévue dans l'Eurocode 2. La prise en compte de la différence d'adhérence entre armatures de précontrainte et de béton armé doit être explicitée.

La problématique de la déformation gênée telle qu'elle apparaît dans la partie 3 de l'Eurocode 2 sera aussi vérifiée et approfondie.

2. Etudier la fissuration des pièces sortant des limites précédemment établies.

C'est-à-dire les pièces épaisses : voiles, radiers, semelles, ou des pièces minces ou épaisses très peu ferrillées soumises à des déplacements imposés gênés. Pour les semelles calculées par la méthode des bielles et tirants, les formules d'ouverture de fissures seront soit adaptées soit reformulées. Les pièces autres que rectangulaires seront envisagées.

Les fissurations provenant de l'effort tranchant et de la torsion seront abordées.

3. Etablir de nouvelles formules pour le ferrailage minimal.

Cela concerne les armatures minimales des éléments de structures minces ou épais lorsqu'ils sont soumis à des déplacements gênés ou à des variations de contraintes internes, de façon à éviter par exemple que pour des structures épaisses le pourcentage d'armatures soit proportionnel à l'épaisseur.

4. Estimer l'importance des fissures.

Enfin il serait souhaitable de définir des ouvertures (liées à l'espacement) et profondeurs de fissures maximales permettant de garantir aux structures une fonction d'étanchéité, ainsi que de corrélérer ouverture de fissure et possibilité de colmatage de celles-ci.

3.2 Déformations gênées

Cinq besoins se font sentir concernant la fissuration sous déformations imposées :

- Pratique simple d'ingénierie permettant de justifier la fissuration sous déformation imposée.
- Validation des caractéristiques thermiques du béton.
- Etat de contrainte de structures type sous déformations imposées en fonction du type de blocage.
- Ferrailage minimal permettant la répartition des fissures sous déformations imposées.
- Analyse des courbes d'effort-déplacement (ou moment-courbure) dans le domaine de la formation des fissures.

Pratique simple d'ingénierie permettant de justifier la fissuration sous déformations imposées

Les déformations imposées peuvent être des déformations d'origine thermique, des déformations dues au retrait ou au fluage ou aux dénivellations d'appuis. Elles posent des problèmes de même type.

La méthode la plus simple pour prendre en compte ces déformations imposées est de les introduire directement, en tant que telles, dans les calculs élastiques de la structure. Si c'est fait avec le module élastique, les efforts internes induits dans la structure peuvent être très importants et entraîner la mise en place de quantités d'armatures élevées, ce qui n'est pas justifié.

Dans la pratique actuelle, la fissuration est prise en compte par une minoration du module d'Young. Cette approche est simple, mais critiquable, car elle ne permet pas de justifier la fissuration, ni en termes de répartition, ni en termes d'ouvertures. C'est pourquoi une approche intégrant un calcul de déformation prenant en compte l'état de fissuration serait plus judicieuse. Une méthode de calcul est donc à mettre au point pour prendre en compte de façon assez simple l'état de fissuration, tout en apportant un progrès significatif par rapport à la pratique actuelle.

Validation des caractéristiques thermiques du béton pour des pièces épaisses

Les propriétés thermiques du béton sont définies dans l'EN1992-1-2 pour traiter la résistance ou la stabilité au feu. Elles dépendent du type d'agrégats. Ces caractéristiques thermiques devraient dépendre aussi de l'état d'humidité du béton. Comment évoluent ces caractéristiques pour des pièces plus humides dans le domaine des températures courantes (0 à 200 °C) ?

Etat de contrainte de structures type sous déformations imposées en fonction du type de blocage

L'EN1992-3 présente en annexe quelques exemples types permettant d'estimer sans calcul l'état de contrainte généré, puis l'ouverture de fissures, dans un voile ou une dalle soumis à des déformations imposées uniformes et bloqués sur un ou plusieurs de leurs côtés.

Une validation de ces résultats est nécessaire.

Des compléments doivent être apportés. Quel est l'effet d'un blocage non infiniment raide (semelle ou radier sur un sol, une levée de bétonnage sur un béton plus ancien, ...) ? Quel est l'effet d'un blocage réparti par rapport à un blocage aux extrémités ?

Le cas de déformation non uniforme n'est pas traité (gradient dans l'épaisseur,...) ainsi que les effets de blocage en rotation.

Ferrailage minimal permettant la répartition des fissures sous déformations imposées

Le ferrailage minimal est traité principalement à partir de raisonnement vis-à-vis de sollicitations mécaniques.

Sous l'effet de déformations imposées, après formation de la première fissure, si la déformation imposée augmente, la contrainte dans les aciers n'augmente pas mais l'ouverture de la fissure peut augmenter si d'autres fissures ne se forment pas. Le ferrailage minimum est celui qui permet de limiter l'ouverture de la fissure en créant une fissuration systématique. Ce ferrailage minimal doit aussi garantir une fermeture de la fissure lorsque la sollicitation cesse. Jusqu'où peut-on réduire le ratio d'armature en maîtrisant la fissuration ?

Analyse des courbes d'effort-déplacement (ou moment-courbure) dans le domaine de la formation des fissures.

Le comportement du béton au voisinage de la fissuration n'est pas très bien connu dans la phase passant de la fissuration non systématique à celle de la fissuration systématique. Or c'est cette partie des courbes effort-déplacement (ou moment courbure) qui est utile pour traiter de la formation et de l'évolution des fissures sous déformation imposée.

3.3 Chargements cycliques

Pratique simple d'ingénierie permettant de justifier la fissuration sous sollicitation cyclique :

L'objectif est de mettre au point des méthodes de calcul destinées à l'ingénierie permettant la prévision de la fissuration en cours de sollicitation et après celles-ci. Des formules de calcul des ouvertures, de l'orientation et de l'espacement des fissures dans les voiles seront ainsi proposées pour les états limites de service et ultime. L'application de la méthode de calcul actuellement présente dans l'EUROCODE 2 ne donne pas de solutions satisfaisantes pour les voiles sollicités dans leur plan et ne traite pas de l'ELU. Les méthodes développées dans le cadre du projet pourraient donc donner lieu à une évolution de la normalisation en la matière.

3.4 Conclusion

Les travaux de R&D et les études de cas en modélisations doivent servir d'une part à expertiser les phénomènes physiques en jeu pour permettre la mise au point de nouvelles méthodes simplifiées d'ingénierie, d'autre part à valider ces nouvelles méthodes par extrapolations vers des applications et configurations pour lesquelles les résultats d'essais sont plus rares.

Avant tout il est donc essentiel de mettre en place un cadre théorique et pratique, définissant des règles de correspondance entre les résultats de simulation, mesures expérimentales, et grandeurs d'ingénierie (ex. module d'élasticité, déformation, contrainte, endommagement / fissure...) pour faciliter leur exploitation dans le but d'atteindre les objectifs de ce projet. Dans ce cadre on intégrera les conséquences de la variabilité de ces paramètres.

4. Liste des tâches

Le travail a été découpé en huit tâches consécutives :

Lot 1 – Bilan, formules et méthodes existantes, rapprochement avec résultats expérimentaux.

Des données seront tirées des expérimentations existantes. Ces résultats seront comparés à ceux donnés par les diverses formules existantes afin d'établir un point 0 de la recherche.

Lot 2 – Participation et suivi du programme expérimental.

Définition des recherches expérimentales à entreprendre en liaison avec les chantiers de modélisation. Suivi des expériences.

Lot 3 – Définition du programme de modélisation numérique.

Sur la base des données manquantes et des types de structure envisagés, définition du programme d'expérimentation numérique.

Lot 4 – Exploitation des résultats expérimentaux et numériques, établissement des formules nouvelles.

Lot 5 – Confrontation des formules trouvées avec les expérimentations connues.

Les tâches 4 et 5 sont à envisager en étroite liaison : après établissement de formules, il est important de les confronter aux résultats expérimentaux existant avant la recherche ou effectué au cours de celle-ci.

Lot 6 – Rapport de synthèse.

Il s'agit du rapport de synthèse de la recherche.

Lot 7 – Rédaction du guide pratique.

Il s'agit d'un guide pratique à usage des professionnels contenant les recommandations d'utilisation des résultats de la recherche, en termes méthodologique et d'utilisation de formules.

Lot 8 – Réunions publiques de présentation.

Il s'agit de l'ensemble des activités de communication des résultats de la recherche : conférences, actions de formation, etc.

5. Méthode de travail et organisation

Des groupes de réflexion par chantier seront formés avec les membres associés du PN qui se sont déclarés intéressés. Ces groupes pourront se rassembler en un groupe unique, qui notamment définira les grandes orientations du projet dans les tâches 2 et 3 et qui ensuite, par des réunions régulières, s'assurera que ces orientations sont bien suivies. Ce sont les responsables des trois activités de la colonne qui assureront le pilotage de ces groupes et qui, pour eux, suivront les autres chantiers de chaque ligne.

Pour mener à bien les tâches 1, 4 et 5, des bureaux d'études seront chargés de faire les travaux de compilation, d'exploitation des résultats et de calibration de formules et méthodes de calcul sous la direction des pilotes, responsables d'activité.

6. Livrables

Les documents émis par cette colonne sont de divers types :

- Lot 1 : La validation de l'existant et ses lacunes et limites seront résumés dans un document qui servira de base aux réflexions des tâches suivantes.
- Lot 2 et 3 : Les documents produits à la suite des discussions des groupes de réflexion serviront de cahier des charges aux colonnes 1 et 2.
- Lot 4 et 5 : les éléments produits ici sont la documentation complète qui servira lors des tâches suivantes.
- Lot 6 : à partir des documents ci-dessus, un rapport de synthèse de la recherche en matière de réglementation et d'ingénierie sera établi.
- Lot 7 : il sera complété par un guide pratique à l'attention des ingénieurs de conception et d'exécution, qui rassemblera à la fois les pratiques d'ingénierie et les modifications et compléments réglementaires proposés.

VII – VALORISATION

Elle sera mise en œuvre en trois phases :

1. Phase 1 : Au lancement du projet

Création d'un site Internet et d'un site Extranet :

Le site Internet présentera le programme du projet, son budget et la liste des partenaires du Projet. Il sera ouvert à tous publics et il sera un des moyens d'information permettant de communiquer sur l'avancement du Projet.

Le site Intranet accessible uniquement pour les partenaires du Projet. Il sera l'outil d'échanges d'informations permanentes entre les partenaires et la gestion administrative et financière du Projet.

Réunion de lancement du Projet

Une réunion publique pour le lancement du Projet sera organisée à laquelle seront convoqués tous les partenaires du Projet et invités tous les organismes et sociétés susceptibles d'être intéressés par ce Projet.

2. Phase 2 : Pendant la réalisation du Projet

Au fur et à mesure de l'avancement du Projet, des conférences seront organisées pour faire le point sur le déroulement des recherches et des expérimentations afin d'informer l'ensemble de la profession des premiers résultats obtenus que le Comité Directeur jugera diffusables.

Création d'un Comité d'experts Internationaux

Dès le démarrage du Projet, un comité d'experts internationaux (3 ou 4) sera constitué afin d'évaluer au fur et à mesure des résultats du Projet et de participer à la relecture des différents livrables fournis.

Comité de rédaction des livrables

Deux comités sont prévus pour définir le contenu des livrables qui seront édités en fin de projet :

- Le premier pour le livre de synthèse des résultats et des recommandations,
- Le second pour le guide technique rédigé à l'intention des ingénieurs de conception et d'exécution.

Le Projet communiquera avec la profession :

- Par le site Internet
- Par des articles scientifiques et techniques
- Par des participations à des congrès et séminaires.

Formation :

Le Projet pourra dès que les résultats seront significatifs, les présenter dans des universités et écoles d'ingénieurs afin de sensibiliser au plus tôt les étudiants. Plusieurs thèses sont également prévues au titre de ce Projet.

Réalisations expérimentales :

Compte tenu de leur importance dans ce Projet, les expérimentations feront l'objet d'une large communication.

3. PHASE 3 : Fin du Projet

Les actions de valorisation qui clôtureront le Projet sont :

- La rédaction puis l'édition français/anglais d'un livre de synthèse des résultats et de recommandations,
- La rédaction puis l'édition français/anglais d'un guide technique à l'intention des ingénieurs de conception et d'exécution,
- Propositions en vue de modifications ou de compléments des textes réglementaires et notamment l'Eurocode,
- Ces trois documents feront l'objet après édition d'une relecture par un comité comprenant notamment les experts internationaux,
- Les résultats du Projet et notamment les trois documents cités ci-dessus feront l'objet d'une présentation publique lors de journées organisées à cette intention, l'une à PARIS et deux ou trois en province et des actions de formation dans les universités et les écoles d'ingénieurs.

VIII. Retombées attendues en progrès techniques, socio-économiques et réglementaires

Progrès techniques :

Ils sont évidemment une meilleure connaissance du phénomène de fissuration des structures nombreuses sortant du champ des règlements et des expérimentations déjà effectuées et ils permettront de mieux envisager la conception et le ferrailage de ces structures, en s'appuyant sur un corpus théorique plus complet. De même, ils permettront de vérifier la capacité de certains ouvrages fissurés à continuer à remplir le rôle pour lequel ils ont été conçus.

Progrès économiques :

Une meilleure connaissance des phénomènes de fissuration permettra de concevoir de façon plus sûre ces structures. En particulier le phénomène de fissuration mieux cerné autorisera des études plus précises des phénomènes complexes existant dans le comportement des dallages qui sont le siège de nombreux désordres.

Progrès réglementaires :

Les limites d'emploi des formules, qui n'existent pas dans l'Eurocode 2, pourront être définies et d'autres formules pour couvrir les structures en dehors du domaine de validité ou sujettes à des sollicitations non envisagées ou peu développées dans les règlements actuels pourront être établies et proposées pour une future évolution de l'Eurocode.

IX -Organisation et fonctionnement

1- Pilotage du projet

La charte jointe, à signer par tous les partenaires du Projet accompagnée d'un résumé du programme, du budget global, de la liste des partenaires et du plan de financement prévisionnel, précise les droits et obligations des partenaires et l'organisation et mode de fonctionnement du Projet.

L'organe de décision est le **Comité Directeur** dont la composition et le mode de désignation sont définis dans la charte. Le Comité Directeur, qui se réunit 2 fois par an, arrête le programme de chaque tranche et approuve les budgets et commandes à passer aux prestataires.

La charte prévoit que le Comité Directeur missionne un **Comité de pilotage et de coordination** pour animer, coordonner et prendre toute décision ne pouvant attendre les réunions du Comité Directeur.

Un **Comité Scientifique et technique** propose au Comité Directeur les détails des actions à réaliser, le choix des prestataires et les montants pour chaque commande de la participation du Projet National. Il se réunit autant que de besoin à l'initiative de son Président. Tous les partenaires qui le souhaitent peuvent assister aux réunions du Comité Scientifique et Technique.

La charte prévoit également un **Comité d'évaluation** composé d'experts français et étrangers extérieurs au Projet.

La gestion administrative et financière sera assurée par l'IREX en qualité de **Mandataire** du Projet.

2- Fonctionnement opérationnel

La présentation ci-après sous forme de matrice fonctionnelle sert de support pour le fonctionnement du projet et identifie les responsables opérationnels.

MATRICE FONCTIONNELLE			Compétences transverses		
			Modélisation numérique C Laborderie	Expérimentation, instrumentation L. Demilecamps	Réglementation, pratique d'ingénierie J Cortade)
Thèmes techniques	Fissuration sous chargement statique monotone	L. Jason	Pilote : L Jason	Pilote : L. Demilecamps	Pilote : J Cortade
	Comportement sous gradients thermo-hydriques sur le comportement (cycles + long terme)	JM Torrenti	Pilote : A. Sellier		Pilote : F Barré
	Fissuration sous chargement dynamique et cyclique	P. Bisch	Pilote : C.Laborderie		Pilote : P. Bisch

X - Budget prévisionnel global

Désignation des actions et tâches	Montant en K€ HT	Part P.N. en K€ HT
1 – Modélisation numérique		
1.1. – modélisation de la fissuration sous chargement statique monotone	550	220
1.2. – modélisation du comportement thermo-hydromécanique du béton	430	170
1.3. – modélisation de la fissuration sous chargement cyclique	306	125
Sous total 1	1 286	515
2 – Expérimentation		
2.1. – exploitation des résultats d'essais disponibles	80	40
2.2. – essais sur voile instrumenté de béton armé à l'échelle 1/3	380	150
2.3. – essais sur blocs à échelle 1/3 instrumentés	200	65
2.4. – essais pour l'étude au jeune âge à l'échelle 1 sur structure épaisse instrumentée	1 400	680
2.5. – essais de caractérisation à petite échelle en laboratoire	720	230
2.6. – rapport d'analyse et de synthèse des résultats des expérimentations	100	50
Sous-total 2	2 880	1 215
3 – Réglementation et pratique d'ingénierie		
3.1. – rapport de synthèse validant l'existant et les lacunes	98	40
3.2. – établissement des cahiers des charges pour les travaux de modélisation et d'expérimentation et suivi de ceux-ci	180	72
3.3. – exploitation des résultats expérimentaux et numériques y compris confrontation de ceux-ci	420	170
3.4. – analyse des résultats de la recherche et établissement d'un rapport de synthèse en matière de réglementation et d'Ingénierie	80	32
Sous-total 3	778	314
4 - Valorisation		
4.1. – création d'un site Internet et Intranet	20	20
4.2. – rédaction et édition d'une synthèse des résultats et des recommandations : Français/Anglais	180	90
4.3. – rédaction d'un guide technique Français/anglais à l'intention des ingénieurs de conception et d'exécution Français/Anglais	150	75
4.4. – proposition en vue de modifications et de compléments réglementaires	70	35
4.5. – comité de suivi et de relecture de la synthèse des résultats et du guide par le comité d'experts internationaux	80	50
4.6. – présentation publique des résultats, conférences et actions de formation	120	60
Sous-total 4	620	330
TOTAL DES ACTIONS 1 à 4	5 564	2 374
Gestion administrative et financière 5 %	278	278
MONTANT TOTAL HT	5 842	2 652
TVA 19,6 %	1 145,03	519,79
MONTANT TOTAL en K€ TTC	6 987,03	3 171,79

XI - PARTENAIRES POTENTIELS (LISTE PROVISOIRE)

1. MAÎTRES D'OUVRAGE

AEROPORTS DE PARIS
ANDRA
AREVA
C.E.A.
E.D.F.
PORT AUTONOME DU HAVRE
R.A.T.P.
SETRA /DGR
S.N.C.F.
VILLE de Paris

2. ENTREPRISES

BOUYGUES
E.G.F./B.T.P.
EIFFAGE
F.F.B.
F.N.T.P.
FREYSSINET
SOLETANCHE/BACHY
SPIE-BATIGNOLLES
VINCI-CONSTRUCTION
SYNDICAT DES ENTREPRISES DE GENIE CIVIL DE L'EAU ET DE
L'ENVIRONNEMENT

3. INDUSTRIELS

HOLCIM
ITALCEMENTI GROUP
LAFARGE
VICAT

3. INGENIERIE-BET

ADVITAM
ARCADIS
COYNE ET BELLIER
EGIS
IOSIS INDUSTRIES
NECS
PX-DAM
SETEC
SITES
J. CORTADE : Expert et Président de la Commission française EC2

5. CENTRES DE RECHERCHE – LABORATOIRES (Publics – Privés)

ATILH
CEA/EMSI
CEMAGREF
CERIB
LRPC Clermont-Ferrand
CETU
C.S.T.B.
ECOLE CENTRALE DE Nantes
E.D.F. R&D
E.N.S. CACHAN
I.N.P.G. Grenoble
INSA Lyon
I.R.S.N.
L.M.D.C. Toulouse
L.C.P.C.
LASAGEC Anglet/Pau
RINCENT BTP

XII - PLAN PREVISIONNEL DE FINANCEMENT P.N. SUR LES BASES D'UNE REALISATION en 4 ANS

1. Montant total du budget prévisionnel :	5 842,00 K€ HT
2. Ressources prévisibles	
2.1. Subvention de l'Etat 5 842,00 x 0,20 =	1 168,00 K€ HT
2.2. Cotisations des partenaires (T = taux de base 4 000 €/an)	
- 5 maîtres d'ouvrage à 2 T =	10 T
Entreprises :	
- 3 entreprises à 3 T =	9 T
- 5 entreprises à 2 T =	10 T
- 2 entreprises à 1 T =	2 T
Industriels	
- 4 industriels à 2 T =	8 T
Ingénieur et BET	
- 4 BET à 1 T =	4 T
- 3 BET à 0,5 T =	1,5T
Laboratoires publics ou privés	
- 3 laboratoires à 2 T =	6 T
- 13 laboratoires à 0,2 T =	2,6T
Soit au total (pour une durée de projet de 4 ans) 4 x 4 K€ = 53,1 T =	849,60 K€ HT
Ramené pour tenir compte d'environ 5 % de défection à :	800,00 K€ HT
2.3. Participation exceptionnelle Maîtres d'ouvrage et Entreprises	
E.D.F., C.E.A. Grands groupes, F.N.T.P., F.F. B.	
- estimation provisoire =	700,00 K€
Montant total prévisible des ressources	2 668,00 K€ HT
Pour un montant total à financer par le P.N. de :	2 652,00 K€ HT
3. Apports en nature des partenaires	3 190,00 K€ HT

XIII -PLANNING PREVISIONNEL GENERAL

Description des tâches	1ère année				2ème année				3ème année				4ème année						
<u>1 Modélisation numérique</u>																			
Benchmark																			
Développement de modèles retenus																			
Livrables																			
<u>2 Expérimentation</u>																			
Maquette échelle 1/3																			
Maquette échelle 1																			
Interprétation essais sur maquettes																			
Expérimentation sur ouvrages																			
<u>3 Réglementation - Ingénierie</u>																			
Exploitation de l'existant																			
Participation et suivi du programme expérimental																			
Participation au programme expérimental numérique																			
Exploitation de l'ensemble des résultats																			
Rapport de synthèse et guides																			
Diffusion résultats et recommandations																			
<u>4 Valorisation</u>																			
Création et exploitation sites internet extranet																			
Rédaction et édition synthèse des résultats																			
Rédaction et édition du guide technique																			
Propositions réglementaires																			
Présentations des résultats, conférences																			
Comité de suivi	Ø				Ø					Ø					Ø	-	-	-	Ø

PROJET NATIONAL CEOSFR

ANNEXES

**ANNEXE 1 – LISTE DES OUVRAGES ET MAQUETTES MIS A DISPOSITION
DU PROJET**

ANNEXE 2 – APPORTS DES AUTRES PROJETS

ANNEXE 3 – REFERENCES

ANNEXE 1

LISTE DES OUVRAGES ET MAQUETTES MIS A DISPOSITION DU PROJET

Les pages suivantes présentent brièvement les expérimentations envisagées ou versées à la communauté.

1.1 - HYDRATATION – VOILE EDF

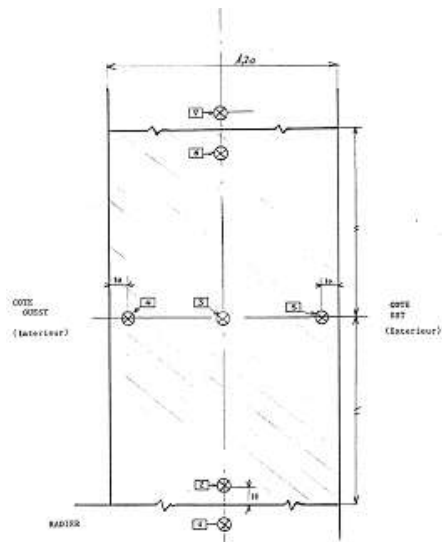
MESURE D'EVOLUTION DE TEMPERATURE SUITE A LA PRISE DU BETON SUR DEUX MAQUETTES METRIQUES EN BO ET BHP

EDF a instrumenté par des thermocouples deux voiles d'1.20 m d'épaisseur, l'un en BO l'autre en BHP, afin de suivre l'évolution des températures suite à la thermo-hydratation et d'en observer les conséquences en terme de fissuration.

Les formulations des bétons mis en oeuvre sont les suivantes

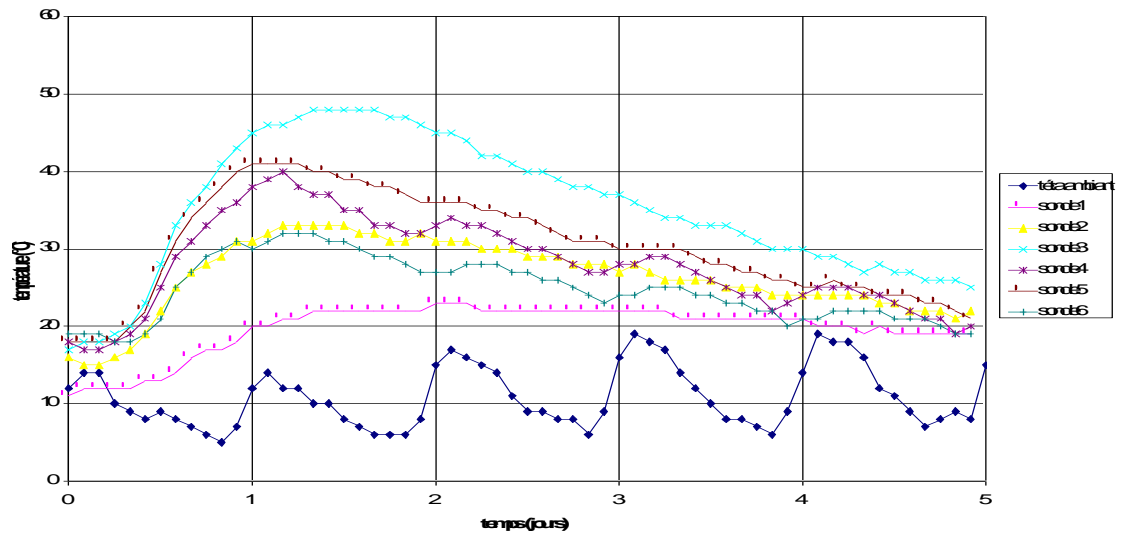
	Maquette BO	Maquette BHP
Granulats d'Arlaut 12,5/25	769 kg	890 kg
4/12,5	303 kg	209 kg
0/5	769 kg	873 kg
Ciment Airvault	CPA55 350 kg	CPJ 55 PM 266 kg
Fumée de silice	-	40,3 kg
Eau d'ajout	195 l	161 l
Adjuvant	1,22 kg (plastiment HP)	9,08 kg (Rhéobuild)

Un schéma d'implantation des capteurs est fourni ci-dessous



Les températures ont été enregistrées pendant 5 jours dans le béton et dans l'air ambiant.

Géométrie aux VI GDI CR55-funécobslie



1.2 - SECHAGE

POUTRES ARMES ET NON ARMES SOUMISES A UN GRADIENT HYDRIQUE

EDF et le LCPC ont conduit un projet d'étude de poutres non réactives et réactives à la réaction alcali-granulat, ce projet a fait l'objet de la thèse de S.Multon au LCPC. EDF-CIH qui était partie prenante du projet propose de mettre à la disposition du PN Fissuration CEOS l'ensemble des résultats expérimentaux concernant les poutres non réactives de cette étude.

Ces poutres sont constituées d'un béton ordinaire dont les caractéristiques mécaniques et le comportement hydro-mécanique peut être déterminé à partir de résultats d'essais sur éprouvettes également disponibles. Les poutres (Figure 1) ont fait l'objet d'un suivi hydrique particulièrement précis (suivi de masse et de profils hydriques), les mesures de déformation et les relevés de fissuration ont également été effectués.



Figure 1 : Poutres sous gradient hydrique

Poutre faiblement armée (P4, P6)

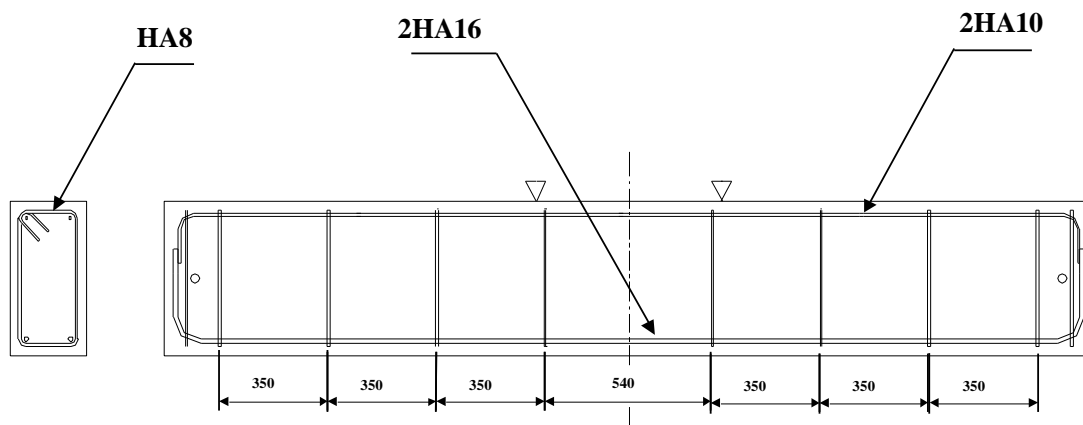


Figure 2 : Schéma de ferrailage de l'une des poutres

Les conditions aux limites hydriques sont variables, la face supérieure est soumise à un séchage pendant 400 jours et ré humidifiée par la suite, (Figure 3).

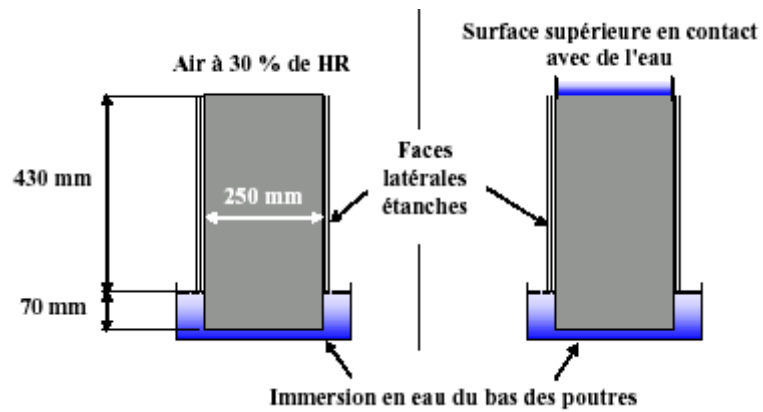


Figure 3 : Conditions aux limites hydriques

Le calcul des champs hydriques et de la déformée de ces poutres est particulièrement instructif en ce qui concerne les effets mécaniques du retrait hydrique sur le long terme. Elles méritent à ce titre une attention particulière.

Ref : Multon S., "Evaluation expérimentale et théorique des effets mécaniques de l'alcali-réaction sur des structures modèles", PhD thesis, Université de Marne La Vallée, France, 2003.

1.3 - AEROREFRIGERANT

FERRAILLAGE MINIMUM ET DURABILITE DANS LES AEROREFRIGERANTS DE CENTRALE NUCLEAIRE

Il s'agit de l'étude expérimentale d'une maquette échelle réduite représentative d'un élément d'aéroréfrigérant soumis aux gradients hygrométriques et thermiques

La géométrie et les dimensions de la maquette choisie sont données dans la figure suivante. Il s'agit d'une "cloche" en béton armé.

Bétons étudiés

Deux types de béton ont été étudiés : un B30 et un B60 dont les caractéristiques mécaniques déterminées sont données dans le tableau suivant.

Résistances en compression et en traction par fendage à 28 jours relatives aux deux bétons étudiés

					Moyenne
B30	Compression en MPa	44,1	41,5	43,7	43,1
	Fendage en MPa	4,2	3,5	3,8	3,8
B60	Compression en MPa	81,4	81,2	81,2	81,3
	Fendage en MPa	5,1	4,7	5,2	5,0

Armatures passives utilisées

Les aciers passifs utilisés pour les dalles supérieures des deux corps d'épreuve sont des aciers HA500 norme 35019.

La disposition de ces aciers est identique pour les deux corps d'épreuve, et seul le diamètre des aciers diffère.

Ainsi, les aciers sont disposées en deux nappes disposées symétriquement, et formant un maillage 0,10 m x 0,10 m avec un enrobage de béton de 15 mm.

Cela donne pour chaque nappe d'acier, dans chaque direction:

- ❑ dans le cas du B30, 10 \varnothing 4 par mètre linéaire, soit un taux de 0,125 %,
- ❑ dans le cas du B60, 10 \varnothing 6 par mètre linéaire, soit un taux de 0,28 %.

Les quatre cotés du tronc de pyramide, quant à eux, ont été armés de la même façon pour les deux corps d'épreuve : deux nappes de treillis soudés \varnothing 4 avec des mailles 0,2 m x 0,1 m auxquels ont été adjoints des filants \varnothing 4 pour réaliser un maillage 0,1 m x 0,1 m et solidariser l'ensemble du ferrailage du tronc de pyramide.

D'autres aciers \varnothing 4 ont été utilisés pour assurer la connexion entre le ferrailage de la dalle supérieure, et celui du tronc de pyramide, et renforcer ainsi la liaison de la dalle sur ses quatre cotés.

Sollicitations imposées

Les sollicitations ont été imposées de la manière suivante: pour chaque corps d'épreuve, un bac inox rempli d'eau a été posé sur un petit muret. Les corps d'épreuve sont alors disposés sur ces assemblages par l'intermédiaire d'un joint caoutchouc afin de réaliser des enceintes fermées. Des résistances chauffantes plongées dans l'eau ont deux objectifs:

- ❑ obtenir une évaporation de l'eau qui allait ensuite se condenser sur la qui allait ensuite se condenser sur la sous-face interne de la dalle donnant 100% d'humidité relative au niveau de la peau du béton,
- ❑ chauffer l'air de l'enceinte à 40°C en chauffant l'eau, une sonde thermique associée à un thermostat a permis d'imposer cette température avec une précision de l'ordre du degré celsius.

Les conditions hygrométriques et thermiques à l'extérieur des enceintes n'ont pas été, tout comme les aéroréfrigérants en fonctionnement, imposées. Ce sont celles de la plate-forme d'essais du LCPC sur laquelle ont été réalisés les essais.

Un suivi régulier de la fissuration des dalles supérieures a été assuré dans le temps par des moyens visuels.

Pour faciliter le relevé des fissures, un quadrillage avec des mailles de 0,1 m de côté a été tracé sur chacune des dalles supérieures, le repérage étant effectué par des lettres et des chiffres.

Trois fissures sur chaque corps d'épreuve (les plus ouvertes) ont été instrumentées afin de suivre l'évolution de leur ouverture au cours de l'essai.

Données disponibles

- ❑ Les propriétés mécaniques des bétons ;
- ❑ La géométrie, les dimensions et les conditions de sollicitation du corps d'épreuve ;
- ❑ L'évolution de la répartition des fissures (maillage de fissures) sur le corps d'épreuve ;
- ❑ L'évolution de l'ouverture des fissures les plus ouvertes.

1.4 - MAEVA

MAQUETTE ENCEINTE EN VAPEUR ET EN AIR

Il s'agit d'une maquette d'essais en béton précontraint, représentative de la partie courante d'une enceinte de confinement.

Objectif initial :

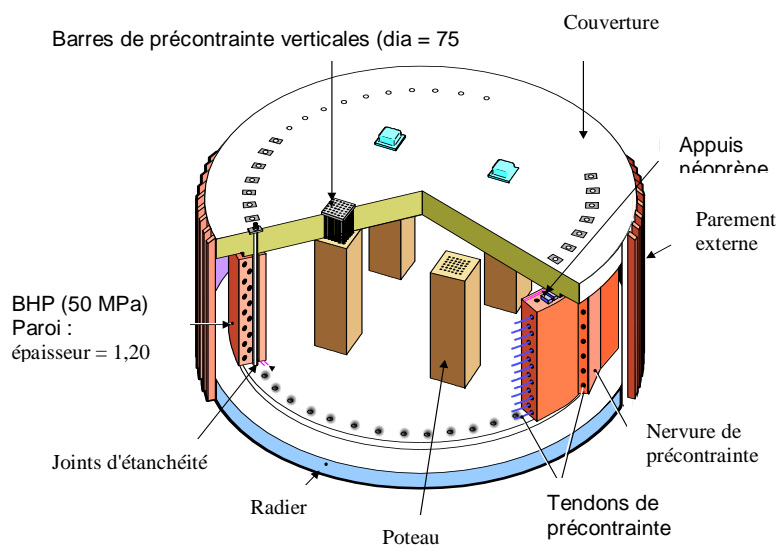
- ❑ mieux comprendre le comportement d'une enceinte de confinement soumise aux sollicitations couplées de pression et température,
- ❑ étudier l'évolution de la perméabilité ainsi que l'état de fissuration de la paroi en béton soumise à des essais en air sec puis en vapeur, à travers les débits de fuite, et,
- ❑ étudier le comportement d'un revêtement composite de complément d'étanchéité de la paroi en béton,

Description sommaire :

- ❑ La maquette construite en 1996 est constituée d'un cylindre de 16 m de diamètre intérieur, 5 m de haut, et de 1,2m d'épaisseur, intégrant à mi-hauteur une traversée de 1,4m de diamètre.
- ❑ Cet anneau réalisé en béton précontraint à hautes performances ($F_{c28}=50$ MPa) comporte :
- ❑ dans le sens horizontal, 13 câbles 16T15 (système C), en deux nappes, assurant une précontrainte moyenne de 5 MPa,
- ❑ dans le sens vertical, dans le cylindre : 70 barres MAC-ALLOY de diamètre 75 mm, engendrant une précontrainte moyenne de 3 MPa.
- ❑ La partie supérieure du cylindre est en micro-béton, du fait de la forte densité de ferrailage.

Deux fonds en béton précontraint de diamètre 20,4 m et d'épaisseur 1 m constituent le radier et la couverture de la structure reliés par quatre poteaux de section 1,5 x 1,5 m en béton précontraint..

L'instrumentation de la structure vise à suivre l'évolution de la température, des déformations et des déplacements (comportement thermo-mécanique) à partir de points de mesure choisis au sein du béton ou en surface.



La pression de dimensionnement de la maquette est de 0,65 MPa.

Plusieurs séries d'essais ont été réalisées. Chaque série est composée d'au moins un essai en air (pression seule) et d'un essai en vapeur (pression et vapeur) avec une pression de 0,65 MPa et une température voisine de 160 °C jusqu'à un essai hors dimensionnement uniquement en air (pression de l'ordre de 1,5 Pdim).

Le bétonnage du cylindre a été effectué en 2 levées.

Les capteurs de température ont permis d'observer le gradient de température dans les sections instrumentées lors de la prise du béton puis, au cours des essais en vapeur, de suivre les régimes d'échauffement et de refroidissement de la paroi en béton,

Données disponibles :

- ❑ Synthèse du dossier de construction,
- ❑ Températures de la paroi (plusieurs points de mesure) et de l'air intérieur et déformations depuis la construction et pour chaque essai en air et en vapeur (sous format Excel),
- ❑ Mesures d'ouvertures de fissures par capteurs de parement.
- ❑ Mesures d'émission acoustique (Sound Print™)

1.5 - MAQBETH

MAQUETTE MAQBETH (CEA SACLAY, LECBA)

Dans le cadre de l'étude sur l'entreposage de déchets radioactifs, le CEA-LECBA a effectué en 2001 un essai sur une structure annulaire en béton armé soumise à un chargement thermique jusqu'à 200°C (Ranc et al., 2003). L'objectif de l'essai était de fournir des données concernant le comportement thermo-hydro-mécanique d'une structure en béton de taille métrique. Le choix d'un cylindre creux en béton armé de 3 mètres de haut, d'un diamètre extérieur de 2,2 mètres, avec des parois de 60 cm d'épaisseur a ainsi été motivé par les contraintes suivantes :

- ❑ disposer d'une épaisseur suffisante pour obtenir un gradient de température élevé, s'affranchir des effets d'échelle et être représentatif d'une structure de génie civil de grande taille,
- ❑ disposer de symétries multiples (radiales) pour permettre la mise en place de nombreux capteurs, de taille éventuellement importante,
- ❑ obtenir des flux d'humidité et de chaleur unidimensionnels.



Description sommaire :

- ❑ anneau en béton armé de diamètre extérieur 2,2 m et intérieur 0,8 m, hauteur 3 m
- ❑ béton BHP 60, $e/c = 0,43$
- ❑ chargement thermique par mandrin chauffant placé à l'intérieur de l'anneau. Chauffage jusqu'à 200°C pendant 2 mois

Données disponibles¹:

- ❑ mesures des températures suivant le plan moyen
- ❑ mesures des pressions de gaz et humidités relatives dans le plan moyen
- ❑ mesures des déformations dans l'épaisseur de la structure et d'ouvertures de fissures en certains endroits

¹ Ranc G., Sercombe J., Rodrigues S., Comportement à haute température du béton de structure. Impact de la fissuration sur les transferts hydriques. Revue Française de Génie Civil. 7(4), 397-424, 2003.

- Comportement global de la structure : un réseau de fissures est apparu en face externe pour une température de paroi d'environ 80° C (t = 17 h). La fissuration s'est développée de manière relativement uniforme, formant un réseau au droit du ferrailage

1.6 - ESSAIS SUR TIRANTS DE L'EPFL (THESE DE PIERRE MIVELAZ , 1996)

Une thèse, financée en partie par EDF, fut soutenue en 1996 par Pierre Mivelaz à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) sur le débit en air à travers des fissures engendrées par sollicitations mécaniques dans des tirants en béton armé (titre : *Etanchéité des structures en béton armé, fuites au travers d'un élément fissuré*²). Ce travail comporte une partie expérimentale qui peut-être exploitée dans le projet :

- ❑ Prédire la fuite à travers une fissure provoquée par sollicitation mécanique dans un élément en béton armé
- ❑ Identifier des relations entre les paramètres mécaniques (contraintes dans les aciers, ouverture de fissures) et débit en air (loi de Poiseuille, coefficient correcteur de débit ou de frottement...)

On ne s'intéressera qu'à la partie relative à la fissuration (ouverture et espacement des fissures fonction du béton).

Description sommaire :

Deux formules de béton testées : « IBAP » (C30/37 ou B30/40, Etot/C = 0.5) et « EDF » (C60/70 ou B75/65, qui est un BHP à 30 kg/m³ de fumée de silice, Etot/(C+FS) = 0.44).

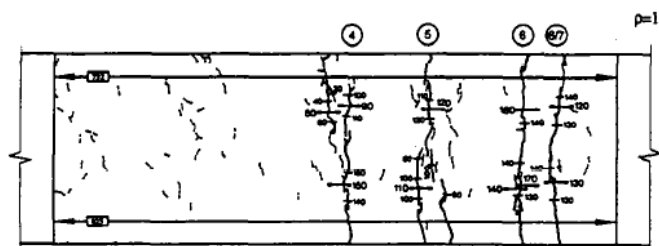
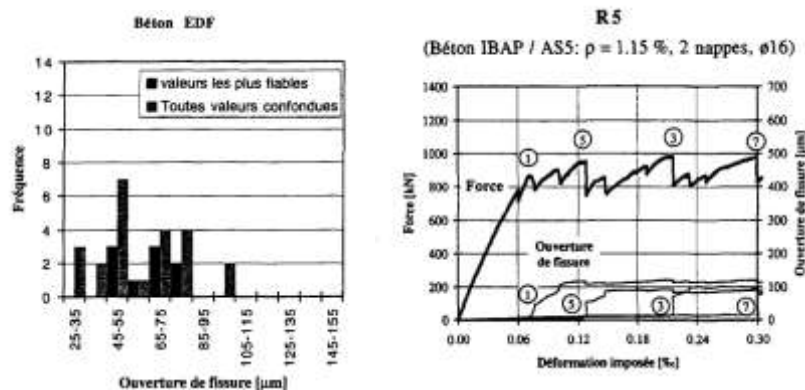
Aciers Fe500, trois taux d'armature : 0.57%, 0.86% et 1.15%

Tirants de 5 mètres de long (3 mètres de zone de mesure) , 1 mètre de hauteur, 0.42 mètre de largeur

T=20°C et HR=60% étant imposées, les essais étaient réalisés trois mois après la fabrication des corps d'épreuve. Le chargement était en déformation imposée jusqu'au seuil de 0.30 ‰ par palier de 0.06 ‰ par jour, en suivant l'état de fissuration. Après les mesures de débit à 0.30 ‰, la déformation a été augmentée plus ou moins vite à 1.5 ‰.

Données disponibles :

La répartition des fissures au cours de l'essai (nbre, espacement) ainsi que leur ouverture moyenne (jauge Oméga) en peau de béton sont décrits (graphique mais pas de données numérisées retrouvées à EDF).



PROJET NATIONAL CEOS

VIADUC DE MILLAU

INSTRUMENTATION DE LA SEMELLE DE LA PILE P2

Le viaduc de Millau, ouvrage d'art exceptionnel multiaubané à nappes axiales et d'une longueur de totale de 2 460 m, comporte 6 travées courantes de 342 m de portée chacune et 2 travées de rive de 204 m de portée. Il repose sur sept piles dont les deux plus hautes P2 (245 m) et P3 (221 m) sont les plus hautes construites dans le monde à ce jour.

Chaque pile est fondée sur quatre puits marocains de gros diamètre (4,50 m et 5,00 m) sur lesquels repose une semelle de grandes dimensions, en plan (20 m x 25 m environ), et de forte épaisseur (comprise entre 3 m et 5 m selon les terrains rencontrés).

Compte tenu des volumes de béton nécessaires pour couler chacune des semelles, soit environ 2 000 m³, en une seule fois sur une durée de 30 heures maxi et de la grande raideur des fondations profondes sur puits, il a été décidé d'instrumenter la semelle de la pile P2 afin de suivre et connaître le comportement de la semelle pendant la prise du béton et son refroidissement.

L'objectif recherché était donc la caractérisation des variations dimensionnelles de la masse de béton de la semelle par rapport à la base constituée des quatre puits marocains.

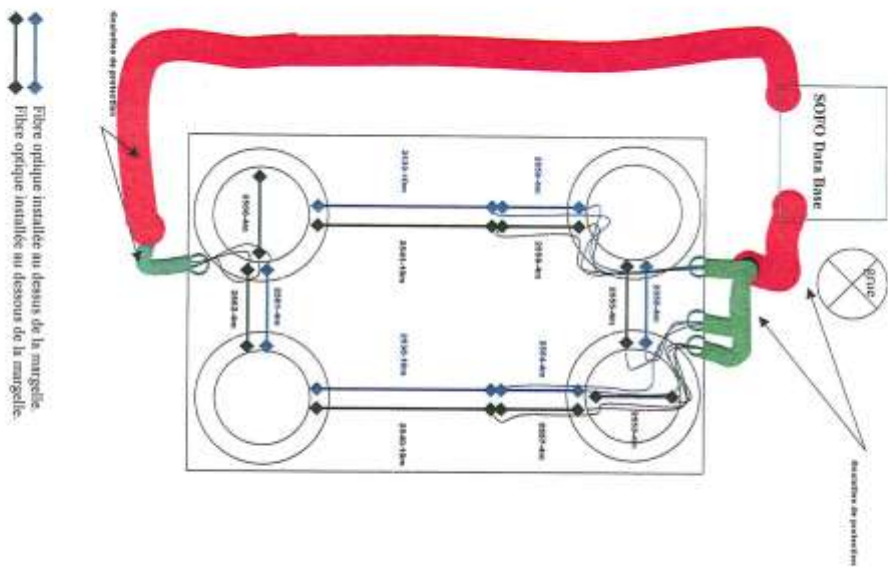
L'instrumentation mise en œuvre comporte ainsi des capteurs à fibre optique de type S0F0 présentant des longueurs de 4 m à 10 mètres (voir figure jointe).

Afin de caractériser le retrait, au sein du béton des puits, il a été disposé deux capteurs de 4 m au cœur de deux des quatre puits marocains.

L'instrumentation spécifique mise en œuvre a permis de suivre, le comportement au jeune âge du béton des semelles, l'évolution de la température dans les semelles de fondation au moment de la prise du béton, le retrait de la semelle, la flexion induite dans les puits de fondation et les efforts de traction dans la semelle.

Les déformations mesurées ont été corrélées avec l'évolution des températures relevées en continu pour une période de un mois.

Le suivi des mesures fait l'objet de courbes pour la période du 24/04 au 24/05/2002.



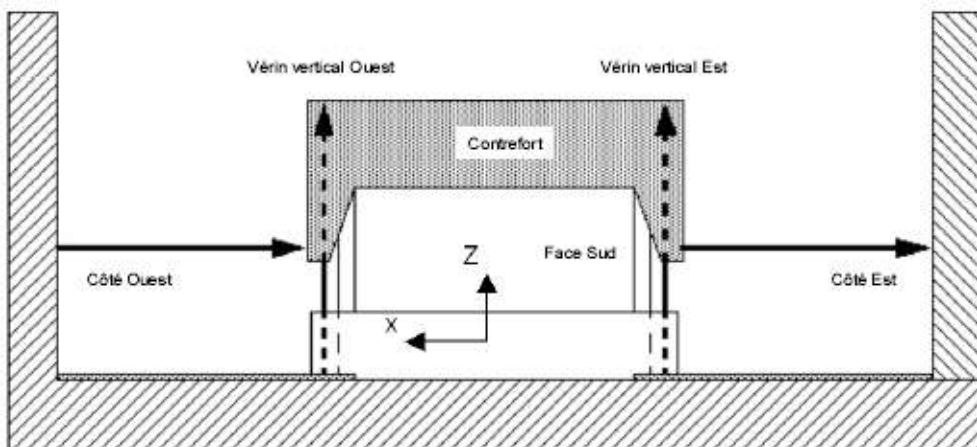
2.8 SAFE

Le programme a été lancé par un groupe d'exploitants nucléaires (COGEMA et EDF) avec l'aide de la communauté européenne pour examiner la résistance au cisaillement des voiles en béton armé peu élancés. Les essais ont été conduits au laboratoire ISPRA en Italie qui comporte une installation capable de mener des essais pseudo-dynamique reproduisant les effets d'endommagement cyclique d'un séisme

Ce programme concerne une série de 13 voiles sollicités en cisaillement. Ils ont pour dimension 1,20 m en hauteur et 3.00 m en longueur. On distingue deux familles : la première (T1 à T4) a une épaisseur de 16 cm, et la seconde (T5 à T13) de 20 cm. A l'intérieur de chaque famille, les maquettes diffèrent par le taux de ferrailage, la fréquence propre et la valeur moyenne de compression verticale. Les pourcentages de ferrailage sont les suivants :

Pourcentage de ferrailage de chaque voile.													
voile	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13
vertical	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.4	0.4	0.4	0.4	0.6	0.4	0.11	0.4
horizontal	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.6	0.6	0.4	0.4	0.6	0.4	0.11	0.4

Le dispositif de chargement, représenté schématiquement sur la figure ci-dessous a été conçu pour interdire toute rotation de la longrine supérieure, ceci pour reproduire l'effet d'un cisaillement pur (absence d'effet flexion d'ensemble).



Comme illustré sur la figure suivante chaque voile a été finement instrumenté de façon à suivre au cours de l'histoire de chargement le développement et la respiration des principales fissures apparues au début de l'expérimentation.



2.9 POUTRES EN FLEXION CYCLIQUE

Poutres armées et non armées soumises à une flexion cyclique

Dans le cadre du développement d'un modèle de comportement cyclique pour le béton, le LMT Cachan a réalisé des essais expérimentaux sur des poutres en flexion cyclique. Lors de ces essais, les poutres ont été soumises à des charges cycliques.

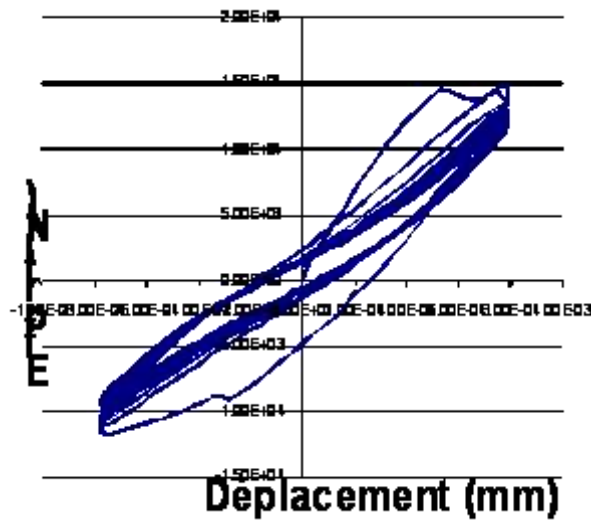
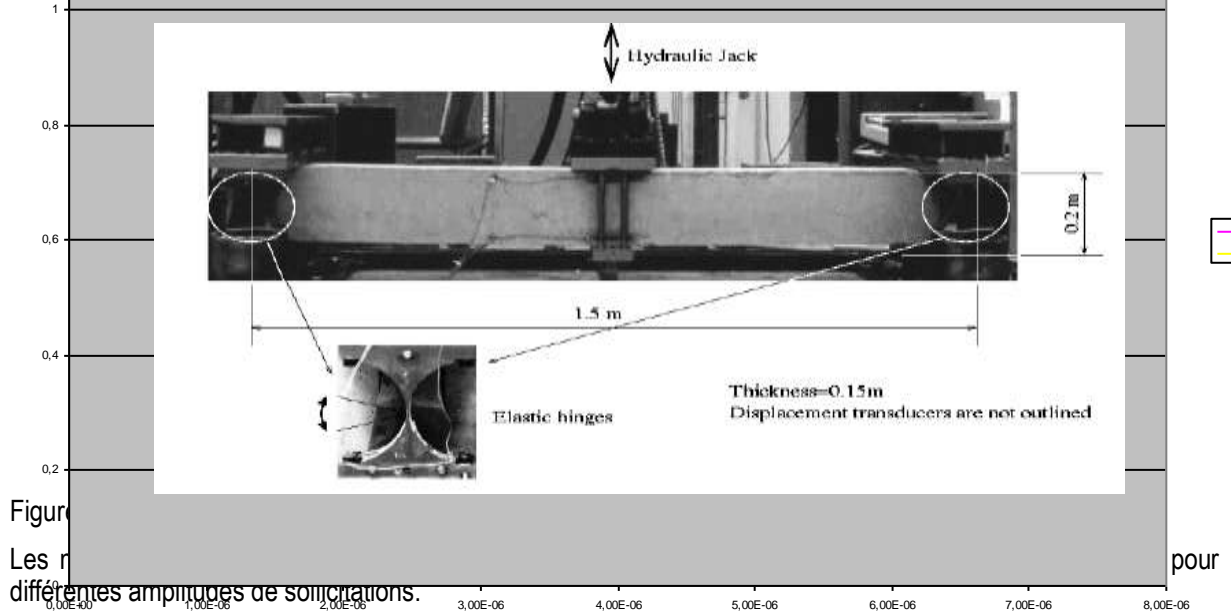
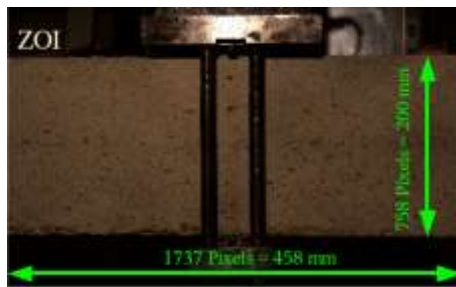
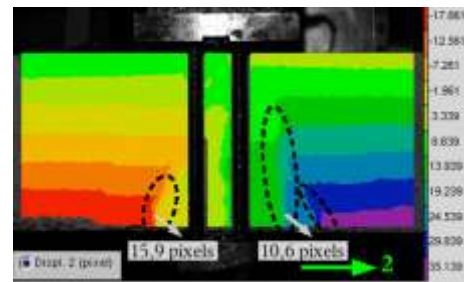


Figure 2 : Exemple de courbe effort flèche

En complément, des mesures de champ de déplacement avec le système « corelli » [2] ont été effectuées récemment sur des poutres du même type [3]. Cette méthode de mesure met bien en évidence la présence de fissure par une discontinuité dans le champ de déplacement, la mesure de l'ouverture de fissure est également disponible.



(a) Champ de l'image



(b) déplacements mesurés

Figure 3 : Mesure du champ de déplacement

Références :

[1] LA BORDERIE, C. « *Phénomènes Unilatéraux dans un Matériau Endommageable: Modélisation et Application à l'Analyse de Structures en Béton* ». Thèse de doctorat, Université Paris 6, École Normale Supérieure de Cachan, 1991

[2] BESNARD, G., HILD, F., ROUX, S. "Finite-element" displacement fields analysis from digital images : application to Portevin-Le Châtelier bands. *Experimental Mechanics*. Vol 46. Num 6. Pages 789-804. 2006.

[3] SOUID, A. « Publication à paraître » 2008

ANNEXE 2 – APPORTS DES AUTRES PROJETS

2.1 Fiche projet ANR APPLET Durée de vie des ouvrages en béton : Approche Prédictive Performancielle et Probabiliste

Projet ANR retenu en 2006
Contact : Jean-Louis TAILHAN

1. Partenaires :

LCPC (Paris – 75), GTM Construction (Nanterre – 92), CERIB (Epernon – 28), OXAND (Avon - 77), CEA (Gif sur Yvette - 91), SYROKKO (Paris – 75), LEPTAB (La Rochelle - 17), LML (Villeneuve d'Ascq - 59), CDGA (Talence - 33), LERM (Arles – 13), LRMH (Champs sur Marne – 77), LMDC (Toulouse – 31), LMT (Cachan – 94)

2. Objectifs :

Les objectifs du projet APPLET sont multiples et s'intéressent principalement au phénomène de corrosion des bétons armés. Le projet est ainsi divisé en 4 groupes de travail (GT) :

- GT1 : Altération du béton – étude de l'interaction béton / environnement
- GT2 : Comportement des structures dégradées par corrosion
- GT3 : Diagnostic électrochimique des ouvrages dégradés
- GTF : Groupe de travail des utilisateurs finaux

3. Organisation et contenu en lien avec le projet national CEOS :

Le projet national CEOS est principalement intéressé par le groupe de travail 2, « Comportement des structures dégradées par corrosion ». Il s'agit dans ce groupe de travail de caractériser de manière efficace et pertinente le rôle de l'interface acier – béton dans la performance globale des structures tout au long de leur durée de vie. Dans ce contexte, les objectifs visés sont :

- de définir l'impact de la corrosion des armatures sur la fissuration du béton pouvant conduire à la perte d'aptitude au service de la structure,
- de définir l'impact de la corrosion des armatures sur l'estimation de la capacité portante résiduelle de la structure.

Cinq actions principales sont envisagées :

- Etude expérimentale et modélisation tridimensionnelle de l'action de la corrosion sur le comportement de l'association acier / béton
- **Modélisation de la fissuration**
- Etude du vieillissement et des comportements différés sur l'adhérence acier – béton
- Impact d'une fissuration localisée sur la problématique de la corrosion
- Exemples d'applications

On note qu'une des actions du projet ANR consiste explicitement à modéliser la fissuration autour de deux points :

- Modélisation améliorée de la fissuration

L'objectif essentiel de cette sous partie est de permettre la prise en compte de la fissuration dans le calcul des structures. Deux pistes sont envisagées : la première (LCPC) est de se baser sur un modèle macroscopique, présentant un certain nombre de qualités, et d'y intégrer les informations nécessaires issues de l'échelle microscopique afin de gérer correctement l'impact mécanique de la fissuration sur le comportement mécanique. Parallèlement à cette approche, la modélisation par macro-élément (Toulouse) est retenue. Cette modélisation permet de prendre en compte la fissuration réelle dans le cas d'un recalcul d'ouvrage après diagnostics ou prévisionnelle dans le cas d'une estimation de durée de vie.

- Modélisation améliorée du comportement des structures dégradées

Les problématiques visées ici sont la modélisation du comportement de l'interface acier / béton (perte locales d'adhérence, effet de pontage de fissures des armatures, redistribution des contraintes). Cette action fait intervenir la notion de comportement d'interface, en introduisant le « moteur » de la fissuration (modélisation de l'adhérence acier – béton, couplée à une modélisation de la dégradation agissant sur les caractéristiques d'interface). Il est à noter qu'une approche probabiliste sera introduite.

2.2 Fiche projet ANR CONTIFISS

Projet ANR 01/12/2005 – 30/11/2007

Contact : Frédéric Dufour (Ecole Centrale de Nantes)

1. Partenaires :

Equipe de Recherche Technologique R&DO (Ecole Centrale de Nantes et Université Polytechnique de Catalogne)

2. Objectifs :

Il s'agit dans ce projet d'établir un lien entre les modélisations continues et discrètes de la rupture et ainsi de permettre – à terme – de répondre à la question de l'estimation d'une ouverture de fissure à l'aide d'un modèle d'endommagement. Plutôt que d'écrire les conditions de transition entre deux formulations (continues et discrètes), la vision issue des milieux enrichis est conservée, à travers l'écriture d'une représentation non locale d'une discontinuité. L'idée est ainsi d'établir sous quelles conditions les lois de comportement non locales peuvent représenter une discontinuité géométrique.

Les objectifs proposés rentrent donc directement dans le centre d'intérêt du projet national CEOS.

3. Organisation et contenu en lien avec le projet national CEOS :

Le projet s'articule autour de trois points :

- Modèles non locaux en déplacement – capacité à décrire une discontinuité

Dans un premier temps, le lieu de la discontinuité sera supposé connu. La capacité de la solution éléments finis à approcher une représentation régularisée de la discontinuité sera évaluée (définition du saut de déplacement au niveau de la discontinuité par résolution d'une équation sur la distance entre le champ calculé avec les méthodes non locales habituelles et le champ discontinu régularisé)

Dans un second temps, il s'agira de mettre en place une technique permettant de localiser la discontinuité au cours du calcul. Pour cela, la résolution d'un problème associé de type thermique est envisagée pour déterminer les isovalues de température donnant l'orientation et la position de la discontinuité.

- Comparaison avec des résultats d'essai mécanique

Cette phase du projet a pour objectif de réunir des données expérimentales permettant d'évaluer la qualité de la modélisation développée précédemment. Le type d'expérimentation proposée est l'essai « brésilien » sur des disques de mortier, permettant de créer une fissure diamétrale au sein d'une éprouvette à l'aide d'un simple dispositif de compression. Les mesures effectuées sur chaque éprouvette seront la charge appliquée, les profils d'ouverture de fissure au fur et à mesure de sa propagation, les champs de déplacement ainsi que des mesures d'émission acoustique. Ces informations seront comparées avec les simulations numériques. Plusieurs matériaux avec différentes longueurs internes seront testés en utilisant des matériaux modèles (mélange de mortiers et de billes de polystyrène)

- Extension : couplage entre l'endommagement et la perméabilité

L'application visée dans ce projet sera étendue au cas du couplage entre l'endommagement et la perméabilité. La pertinence de l'approche mécanique sera donc évaluée en combinant les informations issues de la partie diffuse du processus et celles de la partie discontinue (amplitude de discontinuité calculée par la méthode mise en place). Le même dispositif expérimental que

précédemment sera mis en place en mesurant cette fois la perméabilité du mortier testé en fendage (gradient de pression et charge en simultané). Deux voies pour le couplage avec la perméabilité sont envisagées :

- Développement d'une loi de raccordement entre les lois endommagement – perméabilité classiques (loi de Picandet par exemple) et ouverture de fissure – perméabilité (Poiseuille) et traduction en fonction de l'endommagement. Une loi des mélanges permettra d'évaluer la perméabilité d'une structure à partir de son champ d'endommagement
- A partir du champ d'endommagement, calcul (par la méthode précédemment présentée) de l'ouverture équivalente le long de la fissure et application de la loi de Poiseuille pour évaluer la perméabilité.

2.3 Fiche programme RGCU « Benchmark des poutres de la Rance »

Projet RGCU 2004 - 2005

Contact : Valérie L'Hostis (CEA SACLAY)

1. Partenaires :

- partie expérimentale : CEBTP (Saint Rémy les Chevreuse), EDF R&D (Les Renardières), CEA (Saclay), LCPC (Paris, Melun), LMDC (Toulouse), Oxand (Avon), LERM (Arles), SP Institute (Suède)
- partie modélisation : CEA (Saclay), LCPC (Paris), LMDC (Toulouse), Oxand (Avon), LMT (Cachan), LML (Lille), ECN 5Nantes, Intitute Eduardo Torroja (Madrid, Espagne)

2. Objectifs :

Le projet « Benchmark des poutres de la Rance » a deux objectifs principaux : la validation des modèles mécaniques pour évaluer l'influence de la corrosion des barres d'acier sur des structures en béton existantes (capacité portante), et qualifier l'utilisation de techniques non destructives pour obtenir des informations sur la corrosion des aciers à l'intérieur de structures en béton armé.

3. Organisation et contenu en lien avec le projet national CEOS

Le projet vise à la caractérisation et à la prédiction du vieillissement de poutres ayant subies des agressions marines pendant 40 ans. Il s'articule autour de quatre étapes principales :

- Caractérisation non destructive des poutres (observations visuelles, mesures électrochimiques et électromagnétiques...)
- Essais mécaniques (traction et flexion 4 points)
- Caractérisation des matériaux constitutifs (béton, acier, produits de corrosion)
- Simulations « en aveugle » des essais mécaniques

Un intérêt particulier peut être porté à ce dernier point dans le cadre du projet national CEOS, puisqu'il s'agit d'évaluer la pertinence de différents modèles de comportement. En particulier, sont étudiées des lois :

- pour le béton : modèles continus d'endommagement isotrope ou orthotrope, approches locale ou non locale, lois réglementaires (parabole rectangle), CEB...
- pour l'acier : modèles plastique parfait, plastique avec écrouissage
- pour la liaison acier – béton : liaison parfaite, loi de coulomb, relation trilineaire
- pour l'effet de la corrosion : prise en compte par perte de section et ductilité par exemple

4. Résultats obtenus

La comparaison entre les simulations et le résultat expérimental se fait principalement d'un point de vue global. Les prédictions sont ainsi évaluées sur les courbes force – déplacement relatives aux essais de traction et de flexion quatre points.

ANNEXE 3 – REFERENCES

Références bibliographiques

- Benboudjema F., Meftah F., Torrenti J.-M., "Interaction between drying, shrinkage, creep and cracking phenomena in concrete", *Engineering Structures*, 2005, 27, p. 239–250.
- Benboudjema F., Torrenti J.-M., "Early age behaviour of concrete nuclear containments", 2nd International RILEM Symposium September 11-13, Quebec, Canada, CD-ROM.
- Bisch P., "Ouvertures de fissures en cas de séisme". Rapport Séchaud et Metz de Février 2006. Contrat EDF SEPTEN N° CQN 01067 GC – O. E. n°10.
- Bisch P. & Viardin C. "Interprétation des essais « SAFE » effectués à Ispra". Rapport Séchaud et Metz de Décembre 2000. Contrat EDF SEPTEN N° CQN 0752030 GC.
- Bisch P., "Approche performancielle pour les éléments structuraux", Rapport Séchaud et Metz de Mars 2004. Contrat EDF SEPTEN N° CQN 01067 GC – O. E. n° 2.
- Bisch P., Coin A., "The CAMUS 2000 Research", 12th European Conference on Earthquake Engineering, No 123, London, 2002.
- Bisch P., "Interprétation des essais « NUPEC » ". Rapport Séchaud et Metz de Juin 1998. Contrat EDF SEPTEN N° CQN 2781 GC.
- Borosnyoi A., Balazs G.L., "Models for flexural cracking in concrete : the state of the art", *Structural Concrete*, vol. n°2, 2005.
- Boussa H., Si Chaib A., Ung Quoc H., Mounajed G., La Borderie C., "Finite element modelling of anchors subjected to static and cyclic loads", 6th International Conferences on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures FraMCoS 6, Catania, ITALY June 17-22, 2007.
- Brun M., Reynouard J.M., Jezequel, Ile N., "Damaging potential of low-magnitude near-field earthquakes on low-rise shear walls", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 24, Issue 8, Sept. 2004, p 587-603.
- Buffo-Lacarrière L., Sellier A., Escadeillas G., Turatsinze A., "Multiphase finite element modeling of concrete hydration", *Cement and Concrete Research*, Volume 37, Issue 2, February 2007, Pages 131-138.
- Capra B., Cruz-Diaz J.I., Delmotte P., Mebarki A., Rivillon P., Sellier A., "Approche expérimentale et modélisation du comportement à rupture", *Cahiers du CSTB – n°3310 – Livraison 416 - Janvier-Février 2001*.
- Claire, D., Hild, F., Roux, S. Identification of damage fields using kinematic measurements. *Comptes-Rendus Mécanique*. Vol 330. Pages 729-734. 2002.
- Comi C., Mariani S., Perego U., "An extended FE strategy for transition from continuum damage to mode I cohesive crack propagation", *International Journal for Numerical and Analytical methods in Geomechanics*, 31, pp. 213-238, 2007.
- Coyere R., "Endommagement des parois en béton armé sous séisme. Etude de la fissuration". Document COGEMA. Présentation du 26/11/98.
- Cruz Diaz J.I., Delmotte P., Rivillon P., et al., "Resistance of Masonry Infill Walls to Racking Loading : Simplified Model and Experimental Validation", *Masonry International*, volume 15, n°3, 59-86 2002.
- Cruz Diaz J.I., Sellier A., Capra B., Delmotte P., Rivillon P., Mébarki A., "Etude des murs de contreventement en maçonneries d'éléments de terre cuite à joints verticaux secs", *Cahier du CSTB n° 3199, livraison 407 - Mars 2000 (17 pages)*.

- Cruz Diaz J.I., Sellier A., Capra B., Delmotte P., Rivillon P., Mébarki A, "Murs de contreventement en maçonnerie de terre cuite : approche expérimentale et modélisation du comportement à rupture" (article rédigé en septembre 2000 et destiné à être publié dans la revue française trimestrielle de Génie Civil, éditions Hermès) (9 pages).
- Cruz Diaz J.I., Sellier A., Capra B., Delmotte P., Rivillon P., Mébarki A., "Murs de contreventement en maçonnerie de terre cuite : approche expérimentale et modélisation du comportement à rupture", Cahier du CSTB – n° 3310 - Livraison 416 - Janvier-Février 2001 - 17 pages.
- Cruz-Diaz J.I., "Etude des murs de contreventement en maçonnerie d'éléments de terre cuite", Thèse de Doctorat de l'Université de Marne-La-Vallée, juin 2002
- Cruz-Diaz J.I., P. Delmotte et al., "Fiabilité des murs de contreventement en maçonnerie. Calibration des coefficients partiels d'un modèle simplifié", Revue Française de Génie Civil, Fiabilité des ouvrages de Génie Civil, Conception et maintenance volume 6 n°3/2002, Editions Hermès.
- de Borst R., "Numerical aspects of cohesive zone models", Engineering Fracture Mechanics, 70, pp. 1743-1757, 2003
- de Schutter G., "Degree of hydration based Kelvin model for the basic creep of early age concrete", Materials and Structures, Vol. 32, 1999, p. 260-265.
- Delaplace, A. Fine description of fracture by using discrete particle model. ICF 11 - 11th International Conference on Fracture. 2005.
- Delaplace, A., Ibrahimbegovic, A. Performance of time-stepping schemes for discrete models in fracture dynamic analysis. Int Jnl for Numerical Methods in Engineering. Vol 65. Num 9. Pages 1527-1544. 2006
- Delmotte P., Rivillon P., Wesierski V., Hurez M, "Etudes des murs de contreventement en maçonnerie de blocs en béton cellulaire autoclavé", Cahier du CSTB – Livraison 445 – Décembre 2003 – Cahier n° 3492.
- Delmotte P., Rivillon P., Wesierski V., Hurez M., "Etudes des murs de contreventement en maçonnerie de blocs creux en béton", Cahier du CSTB – Livraison 445 – Décembre 2003 – Cahier n° 3491.
- Desmorat, F. Gatuingt & F. Ragueneau. 2004. Explicit evolution law for anisotropic damage: application to concrete structures", R, ARW-Nato Workshop, Bled, Slovenia, juin 2004. 4 pages.
- Desmorat, R., Ragueneau, F. "Constitutive modelling of damage, internal friction and fatigue for quasi-brittle materials". Euromech Colloquium 460 "Numerical Modelling of Concrete Cracking", 2005.
- Farra B., "influence de la résistance du béton et de son adhérence avec l'armature sur la fissuration", EPFL thèse n° 1359 (1995).
- Fernandez L.E., Ayala G., "Constitutive modeling of discontinuities by means of discrete and continuum approximations and damage models", International Journal of Solids and Structures, 41, pp. 1453-1471, 2004
- Frosch R.J., "Another look at cracking and crack control in reinforced concrete", ASI Structural Journal – May-june 1999.
- Georgin, J. F., Sluys, L. J., and Reynouard, J. M. (2004). "A coupled damage-viscoplasticity model for the analysis of localisation and size effects." Computers and Concrete, 1(2), 169-188.
- Greifenhagen C. "Seismic behaviour of lightly reinforced concrete shear walls", Mémoire de thèse. EPFL. Février 2006 .
- Greifenhagen C., Papas D., Lestuzzi P., "Static-cyclic tests on reinforced concrete shear walls with low reinforcement ratios", experimental report. EPFL. March 2005.
- Grimal E., "Caractérisation des effets du gonflement provoqué par la réaction alcali-silice sur le comportement mécanique d'une structure en béton", thèse de doctorat de l'université Paul Sabatier Toulouse, Fév. 2007.
- Grimal E., Sellier A., Petre-Lazar I., Le Pape Y., Bourdarot E., "A Numerical Model to Simulate Alkali-Aggregate Reaction Degradation", 7th CANMET/ACI International Conference, Montreal, Canada, SP-234-12, pp. 179-190, 2006.

- Grondin F., Dumontet H., Ben Hamida A., Boussa H., Mounajed G., "Multi-scales modelling for the behaviour of damaged concrete", Cement and Concrete Research Preprint submitted to Elsevier Science, 2007.
- Hanna M. Makhoulouf H. M., Faris Amin Malhas F.A., "The Effect of Thick Concrete Cover on the Maximum flexural crack width under service load", ACI-Structural Journal , May -June 1996.
- Hild, F. "CORRELI^{LMT}: a software for displacement field measurements by digital image correlation", Internal report N° 254. LMT-Cachan. 2002.
- Ile N., Reynouard J.M., "Behaviour of U-shaped walls subjected to uniaxial and biaxial cyclic lateral loading", Journal of Earthquake Engineering, Vol. 9, No.1, 2005, p 67-94.
- Ile N., Reynouard J.M., "Lightly reinforced walls subjected to seismic excitations. Interpretation of Camus 2000-1 and 2000-2 dynamic tests", Journal of Earthquake Engineering (JEE), à paraître en 2007.
- Ingraffea G.A.R, Saouma V., "Numerical modeling of discrete crack propagation in reinforced and plain concrete, Fracture Mechanics of concrete: Structural application and numerical calculation", C. Sih, A. Ditommaso, eds, pp. 171-225, 1985
- Jaccoud J.P., "Armature minimale pour le contrôle de la fissuration des structures en béton", EPFL thèse n° 666 (1987).
- Jirasek M., "Comparative study on finite elements with embedded discontinuities", Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering, 188, pp. 307-330, 2000
- Jurkiewicz B. & Bressieux H. "Procès-verbal des expérimentations sur poutres réalisées au Laboratoire d'Etudes et de Recherches en Génie Civil de Strasbourg", Juillet 1998.
- Kotronis P., Raguenu F. and Mazars J., "A Simplified Modelling Strategy for R/C walls satisfying PS92 and EC8 Design", Engineering Structures, 27, 1197-1208, 2005.
- Lacarrière L., Sellier A., Escadeillas G., Turatzinse A., "Modelling of hydration of cement-based composed binders: phenomenological approach", 12th International Congress on the Chemistry of Cement, Montreal, Canada, 8-13 July 2007 (résumé accepté le 28/06/06).
- Langeoire A., "Réévaluation sismique du BAS-BL 1300 MWe P4. Présentation des méthodes de calcul des largeurs d'ouverture de fissure". Note Séchaud & Metz NT – 10247 – 011. Mai 2003.
- Laurencet P., "Précontrainte et armature pour contrôler l'ouverture résiduelle des fissures" EPFL-Thèse n°2028 (1999).
- Lemaitre, J., Desmorat, R. "Engineering Damage Mechanics : Ductile, Fatigue and Brittle Failures" Publisher Springer. Nb Pages 400. 2005.
- Mazars J., Pijaudier-Cabot G., "From damage to fracture mechanics and conversely : a combined approach", International Journal of Solids and Structures, 33, pp. 3327-3342, 1996
- Menou A., Mounajed G., Boussa H., Pineaud A., Carré H.: "Residual fracture energy of cement paste, mortar and concrete subject to high temperature". Therorical and applied fracture mechanics, Volume 45, Issue 1, February 2006, p. 64-71.
- Mivelaz P., "Etanchéité des structures en béton armé fuite au travers d'un élément fissuré", EPFL-Thèse n°1539 (1996).
- Moes N., Dolbow J., Belytschko T., "A finite element method for crack growth without remeshing", International Journal of Numerical Methods in Engineering, 46, pp. 131-150, 1999
- Mounajed G., Boussa H., Grondin F., Menou A., "Transient thermal creep' of concrete: intrinsic behaviour or structural effect?, A multi-scales approach", 7th International Conference CONCREEP7, Nantes, sept. 2005.
- Multon S., "Evaluation expérimentale et théorique des effets mécaniques de l'alcali réaction sur des structures modèles", thèse de doctorat de l'université de marne la vallée, Décembre 2003.
- Multon S., Seignol J.-F., Toulemonde F., Concrete beams, submitted to various moisture environments, Structural Engineering and Mechanics, Vol. 22 N°1, pp. 71-83(2006).

- OECD Nuclear Energy Agency. 1996. "Seismic shear wall international standard problem" – NUPEC's ultimate dynamic response test, Comparison report, NEA/CSNI/R(96)10, Paris-France.
- Peerlings R.H.J., de Borst R., Brekelmans W.A.M., de Vree J.H.P., "Gradient enhanced damage for quasi brittle materials", International Journal for numerical methods in engineering, 39, pp. 3391-3403, 1996
- Pegon P., Magonette G., Molina F.J. Verlezetti G., Dyngeland T., Negro P., Tirelli D. & Tgnoli P., 1998. Programme SAFE. Rapport du test T5.
- Pegon P., Magonette G., Molina F.J. Verlezetti G., Dyngeland T., Negro P., Tirelli D. & Tgnoli P., 1998. Programme SAFE. Rapport du test T12.
- Pegon P., Plumier C., Pinto A., Molina J., Gonzalez P., Tgnoli P. & Hubert O. 2000. U-shaped-wall: Description of the experimental set-up. JRC-Ispra.
- Peiretti H.C., "Supporting document for section 7 of EN 1992-1", November 2001.
- Petit. C., "Contrôle de la fissuration et ancrages en béton armé et précontraint selon l'EUROCODE 2. CUST " département génie civil. Mémoire de thèse. Juin 1999.
- Pijaudier-Cabot G., Bazant Z.P., "Nonlocal damage theory", Journal of Engineering Mechanics, 113, pp. 1512-1533, 1987
- Piyasena R. (Griffith University - Novembre 2002) – "Crack spacing, crack width and tension stiffening effect in reinforced concrete beams and one-way slabs".
- Projet CAMUS 2000. Rapport final. 15/11/02 + Fichiers de résultats associés
- Queval J.C., "ICONS European program seismic tests on R/C bearing walls – CAMUS 3 specimen" Rapport CEA/SEMT/EMSI/RT/00-014/A. 17/03/2000. + Fichiers de résultats associés.
- Rashid Y.R., "Ultimate strength analysis of prestressed concrete pressure vessels", Nuclear engineering and design, 7, pp. 334-344, 1968
- Recherche CAMUS. Rapport final. 10/07/98 + Fichiers de résultats associés.
- Recherche ECOLEADER : "Performance sismique des murs faiblement armés". Rapport de fin de recherche. FFB & EGF-BTP. Mars 2005.
- Rossi P., Ulm F.J., Chauvel D., Schaller I., de Larrard F., Guerrier F. (2001) "Ferrailage minimum et durabilité dans les aéroréfrigérants de centrale nucléaire", Dimensionnement - Calcul numérique, Validation expérimentale, Etudes et recherches des LPC, OA38.
- Sellier A., Barry B. "Modélisation des anisotropie mécaniques induites par la fissuration du béton", " Revue Française de Génie Civil, pp 1197-1224, Volume 5, n° 8, 2001.
- Sellier A., Bary B., "Coupled damage tensors and weakest link theory for describing crack induced orthotropy in concrete", Engineering Fracture Mechanics n°1629, may 2002.
- Sellier A., Bary B., Capra B., Meftah F., "Endommagement anisotrope du béton : Comportement unilatéral et interactions entre endommagements en chargement non radial", Revue Française de Génie Civil, Vol.7, n° 5 /2003.
- Thèse de Paul-Marie Michaud en cotutelle avec CRIB à Québec
- Torrenti J.M., Benboudjema F., "Mechanical threshold of concrete at an early age", Materials and Structures, vol. 38, no. 277, 2005, p.299-304.
- Ulm F.-J., Coussy O., "Couplings in early-age concrete: from material modelling to structural design", International Journal of Solids and Structures, Vol. 35, no. 31-32, 1998, p. 4295-4311.
- Ung Quoc H., Mounajed G., Boussa H., "Contribution to the smeared crack method: new crack local behaviour applied to multi cracks FE model", 11th International Conference on Fracture, Turin-Italy, mars 2005.
- Vecchio F.J. & Collins M.P. 1986. "The modified compression field theory for reinforced concrete elements subjected to shear". J. am. Concrete Inst., 83(2), 219-231.

Eurocodes :

EN1992-1-1. Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings (pour le calcul de l'ouverture des fissures)

EN1992-1-2 Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design (pour les caractéristiques thermiques du béton vis-à-vis du feu)

EN1992-3 Eurocode 2 - Design of concrete structures - Part 3: Liquid retaining and containment structures (pour l'estimation des déformations gênées),

1992-2 Eurocode 2 - Design of concrete structures - Concrete bridges - Design and detailing rules (pour l'estimation des déformations de retrait et fluage).

Supporting documents for section 7 of EN1992-1-1 by Hugo Corres Peiretti

Code modèle

Code modèle FIP-CEB 1978

Code modèle FIP-CEB 1990

Bulletin 235 CEB Serviceability Models April 1997

BAEL 91 révisées 99 : "Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites", Bulletin officiel. Avril 1999.

prEN 1992-1-1 – EUROCODE 2: "Calcul des structures en béton ; partie 1-1: règles générales et règles pour les bâtiments", CEN. Décembre 2003.

CEB-FIP MODEL CODE 1990- Final draft -. July 1991.

Règles étrangères

ACI 207 - béton de masse,

ACI 209 - retrait et fluage,

ACI 224 - fissuration,

ACI 318 - structures en béton (dont les chapitres relatifs à la fissuration ont été réécrits récemment)

SIA 262 - construction en béton (janv 2003) Swisscode