

> Jeudi 4 avril

16 h 00 - 17 h 25 Salle Marie Mauron

SESSION PARALLÈLE

> **FONCTIONNEMENT DES INSTALLATIONS - Pathologie et surveillance du béton**

Présidente: Fabienne RIBEIRO

Docteure en chimie physique

Lucie GOMEZ - Caractérisations expérimentale et numérique des mécanismes de dégradation des granulats au cours d'une réaction alcali-grulats.

Rita TABCHOURY - Étude expérimentale et modélisation des effets de la précontrainte sur le développement des réactions de gonflement interne des bétons.

Rémy HOARAU BELKHIRI - Impact de l'irradiation au très jeune âge des matrices cimentaires sur leur comportement chemo-mécanique à moyen terme.

Klayne DOS SANTOS SILVA - Transposition à grande échelle d'une méthode de contrôle non destructive ultrasonore des bétons – tomographie non linéaire d'un bloc massif sur la plateforme expérimentale ODE.

SUJET DE LA THÈSE

Caractérisations expérimentale et numérique des mécanismes de dégradation des granulats au cours d'une réaction alcali-granulats

Doctorante :	Lucie GOMEZ
Date du début de la thèse :	04/10/2021
Laboratoire IRSN :	PSN-RES/SEMIA/LSMA
Référent IRSN de la thèse :	Frédéric PERALES
Direction de la thèse :	Stéphane MULTON/INSA Toulouse & Benoit FOURNIER/Université de Laval
École doctorale :	Université Toulouse 3 - Mécanique Énergétique Génie Civil Procédés (MEGEP) - ED 468
Financement de la thèse :	IRSN & Hydro-Quebec

Le sujet de thèse s'inscrit dans la question 4 de la Stratégie Scientifique de l'IRSN : Comment évaluer de manière réaliste l'impact sur la sûreté des évolutions des caractéristiques des installations sur toute leur durée de vie ?

L'objectif est l'évaluation, par **une approche expérimentale/numérique**, de la dégradation (expansion, fissuration) des matériaux cimentaires, telles que l'enveloppe de confinement en béton des réacteurs nucléaires, due à la conséquence d'une **Réaction Alcali-Granulats (RAG)**. Cette réaction se déroule en 4 étapes : transport d'ions, dissolution de la silice réactive au contact de la solution basique du béton, précipitation de produits de réaction à partir de la silice aqueuse en solution entraînant un gonflement pouvant conduire à la fissuration de la pâte et des granulats.

Afin de comprendre les mécanismes mis en jeu, un **modèle numérique de transport réactif** (prenant en compte la diffusion et les réactions chimiques) a été mis en place. Le modèle a permis de retrouver les observations expérimentales (gels se formant à l'interface et à cœur du granulat) et une étude paramétrique a notamment mis en évidence l'importance de la dissolution de la silice dans la réaction.

Une campagne expérimentale, ayant pour objectif d'identifier quantitativement les paramètres nécessaires au modèle, est en cours. La cinétique de la réaction dépendant principalement de la réactivité des granulats, 4 granulats de réactivité connue sont étudiés (3 réactifs et 1 non-réactif) afin d'évaluer la différence de comportement face à la réaction. La campagne repose sur :

- des **essais chimiques** : diffusion (coefficients de diffusion et porosité) et solubilité (coefficient cinétique de dissolution et quantité totale de silice réactive disponible),
- des **essais mécaniques** : résistance en compression et en traction, essais d'expansion sur mortier et béton, suivi de l'observation de plaques polies de béton (caractérisation qualitative l'endommagement et la fissuration).

Les résultats de la campagne expérimentale permettent d'observer les différences de comportement des granulats lors de la réaction. En effet, selon la structure et quantité de silice réactive initiale contenue dans chaque granulat ainsi que l'état de leurs réseaux poreux, la cinétique de réaction est différente, menant à des dommages plus ou moins sévères.

Enfin, l'évolution vers la prise en compte de la fissuration est en cours. Des simulations chimio-mécaniques, couplant le modèle de transport réactif et le comportement mécanique, seront effectuées afin d'évaluer l'impact de la fissuration sur l'évolution de la réaction et ses conséquences.

Mots clés : réaction alcali silice, granulat réactif, transport réactif.

SUJET DE LA THÈSE

Étude expérimentale et modélisation des effets de la précontrainte sur le développement des réactions de gonflement interne des bétons

Doctorante :	Rita TABCHOURY
Date du début de la thèse :	20/09/2021
Laboratoire IRSN :	PSN-EXP/SES/LMAPS
Référent IRSN de la thèse :	Georges NAHAS
Direction de la thèse :	Stéphane MULTON/INSA Toulouse
École doctorale : Université Toulouse 3 - Mécanique Énergétique Génie Civil Procédés (MEGEP) - Ed 468	
Financement de la thèse :	IRSN & projet H2020 ACES

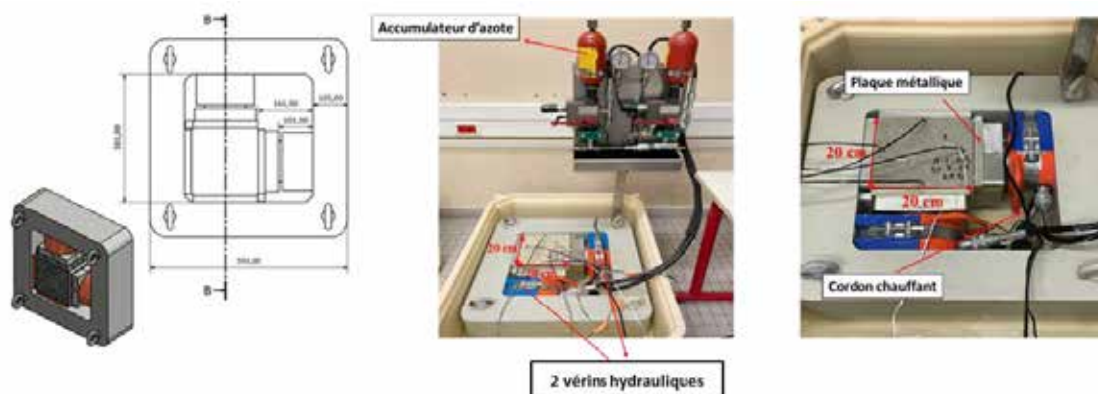
De nombreux ouvrages en béton pourraient être atteints dans le temps et sous certaines conditions, par les réactions de gonflement internes (RGI) avec des conséquences potentielles sur leurs exigences de comportement. Pour être capable de modéliser l'évolution de leur comportement, des recherches doivent être menées pour étudier leurs couplages avec des sollicitations mécaniques présentes dans la structure de l'ouvrage. Il convient de préciser que le fluage du béton provoque des pertes de précontraintes dans les câbles pouvant entraîner une décompression dans le plan de l'enceinte si elles s'avéraient trop élevées. L'enjeu de sûreté dans ce travail de recherche repose sur les fissures provoquées par les RGI. Ainsi, l'exigence principale à laquelle nous nous intéressons est le maintien de l'intégrité structurelle du béton de l'enceinte pour garantir le confinement des matières radioactives en situations accidentelles.

Dans le cadre du projet européen ACES/H2020 et du consortium CONCRETE, ce travail s'appuie sur un programme expérimental complet dans des conditions représentatives de celles des enceintes pour fournir des données représentatives de la situation opérationnelle afin de mieux appréhender les phénomènes et d'améliorer les modèles de simulations.

L'objectif de notre étude est d'évaluer le fluage en compression biaxiale, avec et sans couplage avec des RGIs, afin de comprendre les mécanismes, et de tester, voire d'améliorer les modèles. Un bâti original de fluage biaxial a été conçu pour tester des dalles en béton de 20x20x15 cm³. Leurs déformations sont mesurées suivant les trois directions grâce à des capteurs à fibre optique noyés, résistants aux conditions sévères nécessaires pour accélérer les RGIs. De multiples configurations de fluage, de l'ordre de vingt-six, ont été testées, en compressions uniaxiale et biaxiale, dans des conditions symétriques et asymétriques, avec des contraintes de 8,5 MPa et 12 MPa, représentatives de celles des deux directions de précontrainte des enceintes.

L'analyse des résultats des essais réalisés montre que les déformations de fluage dépendent fortement des conditions de chargement. La distribution asymétrique des contraintes révèle l'importance de l'effet du coefficient de Poisson entre les deux directions. Dans le cas biaxial, les déformations de fluage dans la direction moins chargée (8,5 MPa) et plus chargée (12 MPa) sont respectivement plus faibles et plus fortes que celles mesurées dans les configurations uniaxiales. Les essais avec la présence de RGIs étant toujours en cours, les résultats disponibles de fluage biaxial sans RGI constituent une base de données originales et rares permettant d'évaluer les modèles numériques.

Mots clés : fluage biaxial, réactions de gonflement interne, bâti de fluage biaxial, fibre optique.



SUJET DE LA THÈSE

Impact de l'irradiation au très jeune âge des matrices cimentaires sur leur comportement chemo-mécanique à moyen terme

Doctorant :	Rémy HOARAU BELKHIRI
Date du début de la thèse :	02/11/2021
Laboratoire IRSN :	PSE-ENV/SPDR/LETIS
Référent IRSN de la thèse :	Mejdi NEJI
Direction de la thèse :	Stéphane POYET/CEA
École doctorale :	Université Paris Saclay - Sciences mécaniques et énergétiques, Matériaux et Géosciences - ED 579
Financement de la thèse :	IRSN

Les matériaux cimentaires sont communément utilisés comme matrice de conditionnement de déchets radioactifs de faible et moyenne activité ; ce processus implique que la matrice d'immobilisation soit exposée aux rayonnements ionisants pendant la prise du liant hydraulique. Actuellement, les quelques données disponibles dans la littérature ne permettent pas de statuer sur un potentiel effet de l'irradiation sur l'hydratation de la matrice cimentaire. L'IRSN s'intéresse par conséquent à l'évaluation de l'impact d'un tel phénomène sur les propriétés chémo-mécaniques du matériau durci.

Dans cette étude, différentes pâtes de ciment ont été considérées : silicate tricalcique (C3S), ciment Portland (CEM I) et ciments de Haut-Fourneau (CEM III/A et CEM III/C). Ces matériaux ont été soumis à un rayonnement gamma pendant leur hydratation/prise, à un débit de dose de 2,5 kGy/h pour différentes durée et température d'exposition. La minéralogie, les propriétés mécaniques et la microstructure de chaque matériau ont ensuite été déterminées et systématiquement comparées à deux pâtes témoins analogues, hydratées respectivement à des températures similaires. La minéralogie a été étudiée par RMN, ATG et analyses DRX ; les propriétés mécaniques ont été mesurées par nanoindentation, tandis que la porosimétrie Hg et l'adsorption d'azote ont été utilisés pour les analyses microstructurales.

Les résultats expérimentaux ne montrent pas d'impact significatif de l'irradiation sur les propriétés de ces matériaux ; exception faite d'une élévation de la température, induisant une augmentation de la cinétique d'hydratation. Néanmoins, des analyses RMN 29Si mettent en évidence une diminution de la quantité d'eau liée sur la phase majoritaire, le silicate de calcium hydraté (C-S-H), sur les pâtes de C3S irradiés. Enfin, les mesures portant sur la microstructure des pâtes irradiées de C3S, CEM I et CEM III/A révèlent une diminution de la porosité capillaire accessible, suggérant une quantité moindre d'eau libre pendant la prise des matériaux. Ce phénomène n'a pas été observé sur les échantillons de CEM III/C irradiés.

La phénoménologie responsable n'est pas encore clairement définie : une contribution accrue de la radiolyse sur ce système riche en eau pourrait être mise en cause, un effet de dissolution/précipitation ayant lieu pendant la prise pourrait être également une hypothèse envisageable. Des investigations visant à confirmer ces résultats sont en cours, sur des matériaux similaires ayant déjà été hydratés avant irradiation.

Mots clés : ciment, hydratation, irradiation, déchets radioactifs.

SUJET DE LA THÈSE

**Transposition à grande échelle d'une méthode de contrôle non destructive ultrasonore
des bétons – tomographie non linéaire d'un bloc massif
sur la plateforme expérimentale ODE**

Doctorante :	Klayne DOS SANTOS SILVA
Date du début de la thèse :	20/10/2021
Laboratoire IRSN :	PSN-RES/SEREX/L2EC
Référent IRSN de la thèse :	Benoit DURVILLE
Direction de la thèse :	Vincent GARNIER/LMA
École doctorale :	Aix Marseille Université - Sciences pour l'ingénieur : mécanique, physique, micro et nanoélectronique - ED 353
Financement de la thèse :	IRSN, PACA & MISTRAS Group SAS

L'un des enjeux de la stratégie scientifique de l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) est de trouver les moyens d'évaluer de manière réaliste l'impact sur la sûreté de l'évolution des caractéristiques des installations tout au long de leur vie utile. Dans le contexte des centrales nucléaires, le béton de l'enceinte constitue la structure principale, jouant un rôle crucial dans le confinement de la matière radioactive en cas d'accident. Cependant, des pathologies telles que les réactions de gonflement interne (RGI) peuvent compromettre la durabilité du béton.

Les réactions de gonflement interne (RGI) sont des pathologies qui peuvent conduire à l'expansion et à la fissuration du béton. Ces facteurs dégradent la durabilité des structures, d'où la nécessité de proposer des systèmes de surveillance de l'état des structures pour détecter l'apparition de ces pathologies avant apparition de dégradations notables visibles.

Tenant compte de l'extension de durée de vie des centrales, les propriétés du béton doivent être surveillées pour détecter la formation de fissure, sans avoir recours à des carottages destructifs, d'où la proposition d'une méthode d'Examen Non Destructif (END) adaptée à des structures épaisses.

L'objectif de ce travail est de transposer une méthode d'END ultrasonore dans le domaine non-linéaire du laboratoire (thèse F.OUVRIER-BUFFET 2016-2019) à la pleine échelle (bloc de béton de 1 m d'épaisseur sur programme ODOBA). La technique consiste à analyser l'interaction entre une onde sonde (mesure) et une onde pompe (solicitation) colinéaires. La non-linéarité variant en fonction des contacts imparfaits, elle est normalement sensible à l'apparition de fissuration et son évolution peut être surveillée en fonction du vieillissement.

Après validation sur une maquette à moyenne échelle de la méthode et du matériel développé spécifiquement par le partenaire industriel Mistras Group, les premiers essais à pleine échelle ont été menés pour établir l'état initial du béton (état sec, puis état hydraté à 20°C) avant accélération (saturation à 40°C) de la pathologie RAG. Ces essais permettront de faire émerger les limitations de la méthode et devront conduire à comparer différentes zones du bloc susceptibles d'évoluer en fonction du temps. Des mesures internes par extensométrie et fibre optique sont en place pour lier les évolutions acoustiques à l'état du matériau.

Mots clés : béton, réactions de gonflement interne, acoustique non linéaire, ultrasons.

