



**HAL**  
open science

# Contribution à l'étude du comportement thermo-hygro-mécanique des grands ouvrages en béton

Matthieu Briffaut

► **To cite this version:**

Matthieu Briffaut. Contribution à l'étude du comportement thermo-hygro-mécanique des grands ouvrages en béton. Génie civil. Comue Université Grenoble Alpes, 2018. tel-02096458

**HAL Id: tel-02096458**

**<https://theses.hal.science/tel-02096458>**

Submitted on 11 Apr 2019

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

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

## **Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches (HDR)**

Spécialité : **MATERIAUX, MECANIQUE, GENIE CIVIL,  
ELECTROCHIMIE**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

**Matthieu Briffaut**

Préparée au sein du **Laboratoire Sols, Solides,  
Structures-Risques**  
dans l'**École Doctorale IMEP2**

## **Contribution à l'étude du comportement thermo-hygro-mécanique des grands ouvrages en béton**

Version provisoire du 15/03/2018

Soutenance publique prévue le **26 juin 2018**,  
Jury composé de :

**M. Nicolas Burlion**

Professeur, Université de Lille, Rapporteur

**M. Arnaud Delaplace**

HDR, Lafarge/Holcim R&D, Rapporteur

**M. Olivier Plé**

Professeur, Université de Savoie Mont Blanc, Rapporteur

**M. Frédéric Dufour**

Professeur, INP Grenoble

**M. Gilles Pijaudier-Cabot**

Professeur, Université de Pau et des pays de l'Adour

**M. François Toutlemonde**

HDR, Ifsttar Paris

**Mme Stéphanie Staquet**

Professeur, Université Libre de Bruxelles





## REMERCIEMENTS

## SOMMAIRE

<b>I.</b>	<b><u>INTRODUCTION / PREAMBULE</u></b>	<b>8</b>
<b>II.</b>	<b><u>BILAN DE 6 ANNEES DE RECHERCHE</u></b>	<b>12</b>
<b>II.1</b>	<b>COMPORTEMENT HM DU BETON</b>	<b>13</b>
II.1.1	COUPLAGE FORT EN DYNAMIQUE ET/OU FORT CONFINEMENT	15
II.1.1.1	INFLUENCE DE L'EAU LIBRE SUR LE COMPORTEMENT TRIAXIAL DES BETONS	15
II.1.1.2	PRISE EN COMPTE DE L'EAU LIBRE DANS LA MODELISATION DU COMPORTEMENT DU BETON SOUS IMPACT : ED VS EF.	17
II.1.2	COUPLAGE FAIBLE	22
II.1.2.1	TRANSFERT GAZEUX PRE ET POST RUPTURE	22
<b>II.2</b>	<b>COMPORTEMENT DIFFERE DES OUVRAGES EN BETON</b>	<b>28</b>
II.2.1	APPORT DES SIMULATIONS EF POUR L'AMELIORATION DES METHODES D'AUSCULTATION DES OUVRAGES	30
II.2.2	IMPACT DU FLUAGE SUR LA RESISTANCE DES BETONS	35
<b>II.3</b>	<b>COMPORTEMENT INSTANTANE ET DIFFERE DES INTERFACES BETON /GEOMATERIAUX</b>	<b>38</b>
II.3.2	COMPORTEMENT INSTANTANE D'UNE INTERFACE BETON/ROCHER	41
II.3.3	COMPORTEMENT DIFFERE D'UNE INTERFACE BETON/ARGILITE	43
<b>II.4</b>	<b>CONCLUSIONS</b>	<b>47</b>
<b>III.</b>	<b><u>PROJET DE RECHERCHE</u></b>	<b>49</b>
<b>III.1</b>	<b>COUPLAGE HYDRO MECANIQUE DANS LES BETONS</b>	<b>52</b>
III.1.1	APPORT DE LA TOMOGRAPHIE NEUTRON POUR LA CARACTERISATION DES TRANSFERTS DANS LES MATERIAUX CIMENTAIRES	52
III.1.2	MODELISATION MESOSCOPIQUE 3D THM COUPLEE	56
<b>III.2</b>	<b>COMPORTEMENT HM DES INTERFACES ET MODELISATION</b>	<b>57</b>
III.2.1	CARACTERISATION EXPERIMENTALE DU COMPORTEMENT HYDROMECHANIQUE DES REPRISES DE BETONNAGE (EXTRAIT DU PRE-PROJET DEPOSE EN 2017 A L'ANR EN TANT QUE PROJET JCJC CONJOINT DISPONIBLE EN ANNEXE)	57
III.2.2	MODELISATION DU COMPORTEMENT DES INTERFACES : ELEMENT JOINT HYDROMECHANIQUE	60
<b>III.3</b>	<b>EVALUATION DES RISQUES SCIENTIFIQUES ET ADMINISTRATIFS</b>	<b>61</b>
<b>IV.</b>	<b><u>CONCLUSION GENERALE</u></b>	<b>63</b>
<b>V.</b>	<b><u>ANNEXES :</u></b>	<b>73</b>
<b>CV</b>		<b>73</b>
<b>ACTIVITES PEDAGOGIQUES</b>		<b>74</b>
<b>RESPONSABILITES ADMINISTRATIVES EN LIEN AVEC LA RECHERCHE</b>		<b>74</b>
<b>Liste des publications</b>		<b>76</b>
<b>PRE PROJET ANR JCJC : PROJET CONJOINT</b>		<b>81</b>

## TABLE DES FIGURES

Figure 1: Méthodologie générale de mes actions de recherche	9
Figure 2. Evolution de mon taux d'encadrement et de ma production scientifique (Bilan au 15/03/2018)	11
Figure 3. Méthodologie de la thématique Comportement HM du béton	13
Figure 4 : (a) Courbes d'états limites de la contrainte déviatorique maximale $q_{max}$ en fonction de la contrainte moyenne $\sigma_m$ (b) Courbes d'états limites normalisées par rapport à la contrainte déviatorique maximale du béton ordinaire (OC) - $q_{max}/q_{max,OC}$ en fonction de la contrainte moyenne $\sigma_m$ [Zingg et al., 2016]	16
Figure 5 Influence de l'état de saturation sur la courbe d'états limites de la contrainte déviatorique $q_{max}$ en fonction de la contrainte moyenne $\sigma_m$ pour un béton ordinaire [Zingg et al., 2016].	16
Figure 6 Influence de la porosité sur les états limites des bétons sec normalisé par la résistance déviatorique du béton saturé - $q_{max,dry}/q_{max,sat}$ en fonction de la pression de confinement $p$ , pour 3 bétons (LPC, OC, HPC) [Zingg, 2013].	17
Figure 7 : Prise en compte du taux de saturation dans le modèle PRM couplé : comportement volumique (a) Seuil de contrainte déviatorique (b)	18
Figure 8 : Performance du modèle PRM couplé après modifications	18
Figure 9 : Vue de la déformation principale maximale sur la face arrière à la fin de la simulation - Comparaison avec la face arrière de la dalle du test de perforation a) Nouveau modèle PRM couplé, b) Modèle PRM couplé original, c) Essai	19
Figure 10 : Surface seuil en cisaillement du modèle ED (en Pa)	20
Figure 11 : Essai triaxial sur béton, éprouvette réelle et maillage associé (a), Comparaison mesure / simulation pour la phase déviatoire à une pression de confinement de 600 MPa et un degré de saturation de 100% ou 0%	20
Figure 12 : Evolution de la vitesse du projectile lors de la pénétration dans une dalle de béton	21
Figure 13. Comparaison des réponses mécaniques (force en fonction du déplacement horizontal d'un point proche de la lèvres de la fissure) lors d'un essai brésilien pour deux méthodes de régularisation non locales (a) propagation de l'endommagement pour le modèle SBNL (b)	24
Figure 14. Evolution de la perméabilité moyenne en fonction du déplacement horizontal d'un point proche de la lèvres de la fissure selon différentes approches.	24
Figure 15 : Système de mesure de la perméabilité résiduelle, Essai d'étanchéité (a), mesure longitudinale (b) mesure radiale (c)	25
Figure 16 : Principe de l'essai Push-in [Tixier, 2013].	25
Figure 17 : Evolution des propriétés de transfert lors d'un essai de type Push-in	26
Figure 18. Méthodologie de la thématique Comportement différé des ouvrages en béton	29
Figure 19 : maillage de la maquette numérique d'un barrage voûte	30
Figure 20 : Evolution de la dispersion des modèles HST et HST'T lors du traitement d'une série de déplacements heuristiques issus de calcul EF à complexité croissante (1. Prise en compte de la température de l'air, 2. Prise en compte de la température de l'air et de l'eau, 3. Prise en compte de la variation de la cote de retenue, 4. Ajout du rayonnement solaire, 5. Ajout de l'influence thermique du vent) [Tatin et al., 2015]	31
Figure 21 : Ajustement des déplacements issus de l'approche basée sur le théorème de réciprocité thermo-élastique : fonction d'influences thermiques (a) et séparation des effets des déplacements thermiques (b)	32
Figure 22 : Type de représentation possible pour une modélisation incomplète d'un ouvrage : représentation de type anneau ou secteur (a) et de type PACE (partie courante d'enceinte) (b)	33
Figure 23. Evolution des déformations tangentielles en intrados (bleu) et extrados (rouge) au cours de la vie d'un ouvrage : Mesures in situ et simulations	34
Figure 24. Banc de fluage permettant le chargement simultané de plusieurs échantillons en compression (a) et en traction indirecte (essais dit « brésiliens ») (b)	35
Figure 25. Evolution des performances mécaniques d'un béton après fluage en compression (a) et en traction (b)	36
Figure 26. Exemple de maillage mésoscopique utilisé	36

Figure 27. Evolution de déformation de fluage : Comparaison entre données expérimentales et l'approche mésoscopique avec et sans endommagement (a) champs d'endommagement associés ( $t=250j$ ) pour les quatre niveaux de chargement (b)[Kammouna et al., 2017]	36
Figure 28. Méthodologie de la thématique Comportement instantané et différé des interfaces béton/géomatériaux	38
Figure 29. BCR3D (a) Profilomètre laser (b) et exemple de carte 3D de la rugosité pour une interface granit béton (c)	39
Figure 30. Evolution de la contrainte de cisaillement au pic et résiduelle en fonction de la contrainte normale pour différents échantillons (rugosités différentes) (a), photo post mortem d'un échantillon de géométrie réelle (b), Processus de rupture d'un échantillon de géométrie académique (c)	42
Figure 31. Schéma de rupture potentielle pour un profil de rugosité 2D	42
Figure 32. Création d'un maillage mésoscopique d'une interface : Surface réelle (a), relevé d'altitude de l'interface (b), maillage des parties hautes et basses de l'interface (c) et (d), maillage complet (e), coupe sur le maillage (f).	43
Figure 33. Concept général d'un banc de fluage équipé d'un SinCBox ([1] vérin hydraulique, [2] capteur d'effort, [3] demi boites de cisaillement) [Stavropoulou et al., 2017]	44
Figure 34. Evolution des déformations différées et influence du mode de réalisation d'interface béton/argilite (a) ; critère de rupture pré et post fluage (CNV : constant normal volume / CNS : constant normal stress) (b)	44
Figure 35. Evolution du processus de fissuration/imbibition dans une argilite par deux modes de visualisation : N (Neutrons), X (Rayons-X) [Stavropoulou et al., 2018]	45
Figure 36. Illustration de la perte de qualité d'image liée à la rapidité d'acquisition : coupe d'une tomographie obtenue en 1min, taille des pixels $200\mu\text{m}$ (a) ou en 1h, taille des pixels $50\mu\text{m}$ (b)	54
Figure 37 : Séquences de coupes verticales à partir de volumes 3D reconstituées montrant l'évolution du front de séchage à différents temps de chauffe en HPC 4mm (à gauche) et HPC 8 mm (à droite) (a), comparaison des images obtenues en « fast » tomographie	55
Figure 38 : Environnement scientifique de l'étude (a) Planning du projet (b)	59

## Notations

<i>Variables</i>	<i>Modèles / Simulations</i>
$\sigma_m = (\sigma_x + 2p)/3$ mean stress	ED : Eléments discrets
$q$ deviatoric stress ( $q = \sigma_x - p$ )	EF : Elements finis
$p$ confining pressure	E-FEM : “Enriched Finite Element Method”
$\sigma_x$ principal axial stress	HM : Hydro-Mécanique
	HST : Hydro Saisonnier Temporel
	HSTT : Hydro Saisonnier Temporel Temperature
	KST : Krieg – Swenson - Taylor
	ML : “Matching Law”
	PACE : Partie Courante d’Enceinte
	PRM : Pontiroli – Rouquand - Mazars
	SBNL : “Stress based Non Local”
	SD : “Strong discontinuity”
	THM : Thermo-hydro-mécanique
	VER : Volume élémentaire représentatif
	VSR : Volume Structurel représentatif
	<i>Installation expérimentales / matériaux</i>
	BCR3D : Boite de Cisaillement des Roches tri-Dimensionnelle
	CL : Conditions Limites
	CNS : “Constant Normal Stress”
	CNV : “Constant Normal Volume”
	E/C : Rapport Eau / Ciment
	GIGA : Presse triaxial pour béton
	HPC: “High Performance Concrete”
	LPC: “Low Performance Concrete”
	NEXT: “Neutron and X-Ray Tomography”
	OC: “Ordinary Concrete”
	RMN : Résonance Magnétique Nucléaire
	SINCBOX: “Shearing INterface Creep BOX”
	UHPC : “Ultra High Performance Concrete”
	DESSIS : Durabilité et sûreté des structures en interaction avec le sol
	<i>Autres</i>
	STAR : “STate of the ARt”
	WOS : “Web of Science”
<i>Abréviations</i>	
<i>Institution / Projet</i>	
3SR : Sols, Solides, Structures - Risques	
ANDRA : Agence National pour la gestion des Déchets Radioactifs	
ANR : Agence Nationales pour la Recherche	
CEA : Commissariat à l’Energie Atomique	
CETU : Centre d’Etude des Tunnels	
COST : COopération européenne en Science et Technologies	
DGA : Direction Générale de l’Armement	
DTG : Direction Technique Générale	
EDF : Electricité de France	
ENS : Ecole Normale Supérieure	
IFSTTAR : Institut Français des sciences et technologies des transports, de l’aménagement et des réseaux	
ILL : Institut Laue Laugevin	
IRSN : Institut de Radioprotection et de Sureté Nucléaire	
LECBA : Laboratoire d’Etude du Comportement des Bétons et des Argiles	
LMT : Laboratoire de Mécanique et de Technologie	
MACENA : MAîtrise du Confinement d’une ENceinte en Accident	
PERENITI : ProgrammE de Recherche pour l’EvaluatiON de l’Intégrité des sTructures de géIne civil	
RV : Risque et Vulnérabilité des structures	
UFR : Unité de Formation et de Recherche	
UGA : Université Grenoble Alpes	
VERCORS : VERification Réaliste du Confinement des RéacteurS	



## I. Introduction / Préambule

Après une thèse réalisée au laboratoire de mécanique et de technologie de l'ENS de Cachan encadrée par F. Benboudjema (LMT), G. Nahas (IRSN) et dirigée par J.M. Torrenti (IFSTTAR), puis un projet post doctoral effectué au sein du Laboratoire d'étude du comportement des bétons et des argiles au CEA de Saclay (encadré par V. L'Hostis et S. Poyet), j'ai été recruté en 2011 au sein de l'équipe RV (Risques, Vulnérabilité des structures et comportement mécanique des matériaux) pour la partie recherche et à l'UFR Phitem de l'Université Grenoble Alpes (UGA) pour la partie enseignement. Au cours de ma thèse ayant pour objectif l'étude de la fissuration au jeune âge des structures massives en béton, j'ai développé un essai dit global. Durant celui-ci, un nombre important de phénomènes ont lieu simultanément. En conséquence, pour analyser précisément cet essai et être capable d'en extraire des conclusions transposables à l'échelle d'une structure, la simulation numérique est nécessaire. C'est donc avec des bases scientifiques orientées vers l'expérimentation mais également des connaissances et compétences en modélisations numériques (modèle éléments finis chemo-thermo-visco-élastique endommageable) que j'ai intégré le laboratoire Sols, Solides, Structures - Risques (3SR / UMR 5521).

Durant ces années de recherche en tant que maître de conférences, je me suis principalement intéressé au comportement des structures massives en béton (tunnels, barrages, enceintes de confinement des centrales nucléaires) sous sollicitations de services et/ou accidentelles. Au-delà de leurs tailles imposantes, ces ouvrages sont aussi exceptionnels par leurs fonctions. En effet, il s'agit le plus souvent d'ouvrages dit stratégiques pour la production d'énergie électrique ou pour le stockage des déchets de la filière nucléaire. De plus, même si certains ouvrages (et notamment les enceintes de confinement des centrales nucléaires) peuvent paraître géométriquement semblables, chaque ouvrage reste une structure unique. Les modes de conception, de constructions, et les matériaux ont évolué au cours des années pour accroître leur sûreté au fur et à mesure de l'évolution des connaissances et des règlements. Par ailleurs, ces ouvrages d'art sont en très forte interaction avec leurs environnements géologiques et/ou ambiants et doivent dans le cas des barrages notamment s'adapter à la topologie du site. Il est à noter que les thématiques des recherches développées bien qu'ayant majoritairement un caractère amont possède également un caractère applicatif qui m'a permis de construire des partenariats industriels forts notamment avec EDF (Electricité de France) par le biais d'une Chaire industrielle d'excellence (Chaire Pereniti ; titulaire F. Dufour) et l'ANDRA (réfèrent 3SR du groupement de laboratoire GL Mouv pour les aspects liés au comportement du béton).

L'étude de ces ouvrages est rendue complexe par la diversité des échelles à prendre en compte à la fois spatiales et temporelles. En effet, les dimensions des ouvrages massifs en béton peuvent atteindre la centaine de mètres alors que le béton qui est évolutif et très hétérogène présente des échelles de porosité allant du millimètre au nanomètre. La durée de vie de ces ouvrages est notamment pilotée par sa capacité à retenir un fluide (confinement). Or, les propriétés de transferts, même à l'échelle d'un très grand ouvrage, dépendent de grandeurs locales comme le nombre de fissures, leurs ouvertures et leurs tortuosités, ce qui nécessite de descendre jusqu'à l'échelle du mm. De surcroît, selon la nature de la sollicitation (dynamique, quasi-statique ou constante mais de longue durée), l'échelle de temps pertinente est très différente. Le positionnement dans l'espace/temps

des différentes études est donc un point clé si l'on veut pouvoir conclure de manière objective et mettre en évidence les phénomènes physiques qui gouvernent le comportement du matériau béton et des structures constituées de celui-ci.

De ces études, plusieurs thématiques se dégagent, chacune nécessitant des développements méthodologiques, des essais, des modèles de comportement et des outils numériques spécifiques. La première concerne le comportement HM de béton, la deuxième a trait au comportement différé des structures et la troisième s'intéresse au comportement des interfaces entre les structures en béton et leur environnement géologique. Dans la plupart des cas, les approches de type numérique, expérimental ou analytique sont, par nécessité, conduites parallèlement afin de s'alimenter mutuellement. Si j'ai débuté ma carrière de chercheur par une thèse orientée majoritairement vers des études expérimentales, je me suis rendu compte de la nécessité pour mener à bien des recherches orientées vers l'application de coupler l'ensemble des méthodes à la disposition du chercheur. Pour cette raison, la part de modélisation numérique a pris une part croissante au cours des années pour trouver à présent un équilibre permettant une réelle synergie. Au travers de ces trois thématiques, les matériaux cimentaires et les structures composées de ceux-ci sont des objets d'étude récurrents. Par ailleurs, la méthodologie globale, présentée sur la Figure 1 que j'utilise pour mener à bien mes actions de recherche, est elle-même aussi similaire pour les différentes thématiques même s'il est bien évidemment entendu que l'ensemble des étapes de cette démarche ne sont pas complètement couvertes pour chacune d'elles.

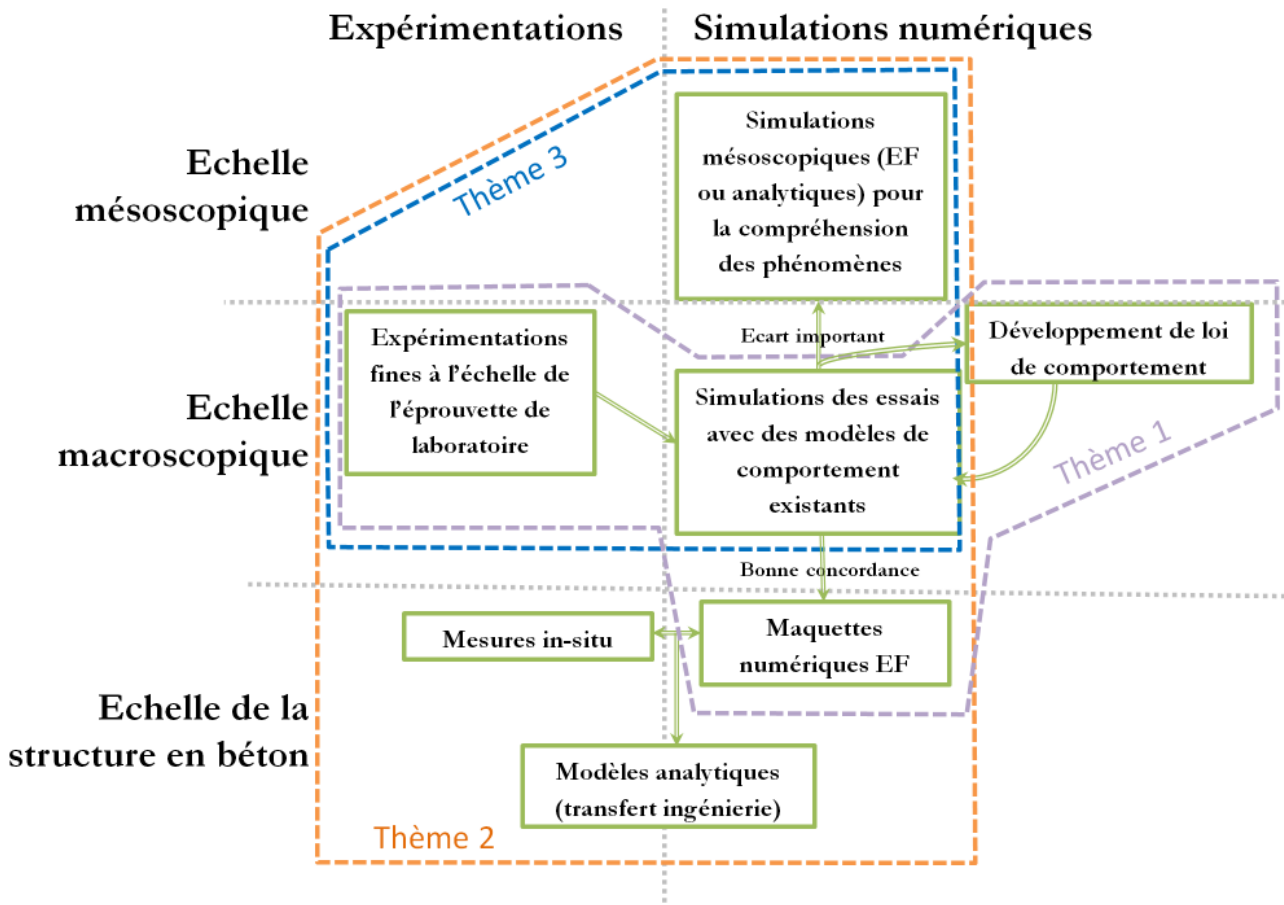


Figure 1: Méthodologie générale de mes actions de recherche

La tenue dans le temps (durabilité) des ouvrages stratégiques précédemment cités ou vis-à-vis de sollicitations externes sévères est un enjeu sociétal majeur au regard du coût humain et économique lié à une éventuelle défaillance. Les propriétés du matériau (en termes mécanique et/ou de transfert) à un instant donné et son comportement différé sont fortement influencées par son état d'endommagement et par la présence d'eau au sein du réseau poreux. D'autre part, le départ d'eau du matériau (saturé ou quasiment saturé à la fin de la construction et en déséquilibre avec le milieu extérieur) génère des variations volumiques différentielles et l'apparition de contraintes mécaniques dans le matériau et dans la structure. Pour comprendre le comportement d'un matériau et prévoir celui de la structure, ces phénomènes doivent donc être étudiés. Dans une première partie de ce mémoire, je présenterai un bilan de mes activités de recherche en trois chapitres. Le premier concerne le comportement hydromécanique du béton en utilisant un couplage fort ou faible selon la nécessité de l'étude, le deuxième aura trait au comportement différé des bétons et à son influence sur l'auscultation/monitoring d'ouvrages et le dernier s'intéressera aux comportements des interfaces entre le béton et deux géo-matériaux environnant les structures suscitées. En débutant chaque sous-chapitre par une présentation du contexte, j'exposerai ensuite la méthodologie adoptée, je présenterai quelques résultats scientifiques qui me semblent originaux et pertinents et je finirai par une analyse critique de ces travaux. La deuxième partie, consacrée aux perspectives, me permettra de présenter les travaux que j'envisage dans un avenir proche qui prennent naissance grâce aux trois thématiques précédemment décrites. A long terme, ces travaux doivent tendre vers le développement d'outils capables de prévoir le comportement d'une structure en béton (armé et/ou précontrainte) en y intégrant son état réel qui est fortement influencé par les aspects liés au jeune âge et à son vieillissement ainsi que son environnement proche (solide ou fluide). Au-delà des résultats scientifiques, ce sont surtout les dispositifs expérimentaux, les modèles numériques développés et les méthodologies d'études utilisées qui seront adaptés et améliorés pour pouvoir répondre aux challenges scientifiques et industriels que je présenterai dans la partie perspectives.

Même si je continue à m'intéresser de près à la thématique de mon travail de thèse à savoir le comportement au jeune âge des structures en béton et que certaines de mes publications récentes y ont attiré, je ne développerai pas dans ce mémoire de chapitre sur ce sujet car mes actions relèvent plus de l'expertise/conseil que de réels développements. En effet, depuis mon arrivée au laboratoire 3SR, je me suis intégré dans une nouvelle équipe, dans de nouveaux projets et j'ai préféré ouvrir de nouveaux axes de recherche originaux. Néanmoins, il faut souligner ici que ce champ de recherche me permet d'avoir une certaine visibilité internationale à travers mon implication dans l'action COST 1404 en tant que co-leader d'un GP (*group priority* sur la modélisation macroscopique du comportement des structures en béton), la participation à l'écriture d'un STAR (*state of the art*) sur la fissuration des structures massives dans le cadre d'un TC (*Technical committee*) de la Rilem et dans l'organisation d'une session à Alert Geomaterial en 2016.

La figure 1 et le tableau 1 permettent d'une part de visualiser l'évolution de ma production scientifique ainsi que mon pourcentage d'encadrement (% cumulés ; 1 thèse avec deux encadrants = 50%, 1 thèse avec trois encadrants = 33%) et d'autre part de faire un bilan quantitatif à partir de certains indicateurs. Un taux d'encadrement de 400% correspond à 9 thèses soutenues dont 4 avec une implication de ma part à hauteur de 33% et 5 avec une

implication de 50% ainsi qu'une thèse en cours avec une implication de 33%. En 2017, la thèse d'Hani Cheick Sleiman a commencé sous ma direction (bourse ministérielle, agrément de direction obtenu en 2017), celle de S. Dal Pont (Co-directeur) et l'encadrement de A. Tengattini mais n'apparaît pas encore sur la figure 1. Cette production scientifique ainsi que l'encadrement de doctorants et mon activité contractuelle m'a permis d'être lauréat depuis 2015 de la prime d'encadrement doctorale (PEDR).

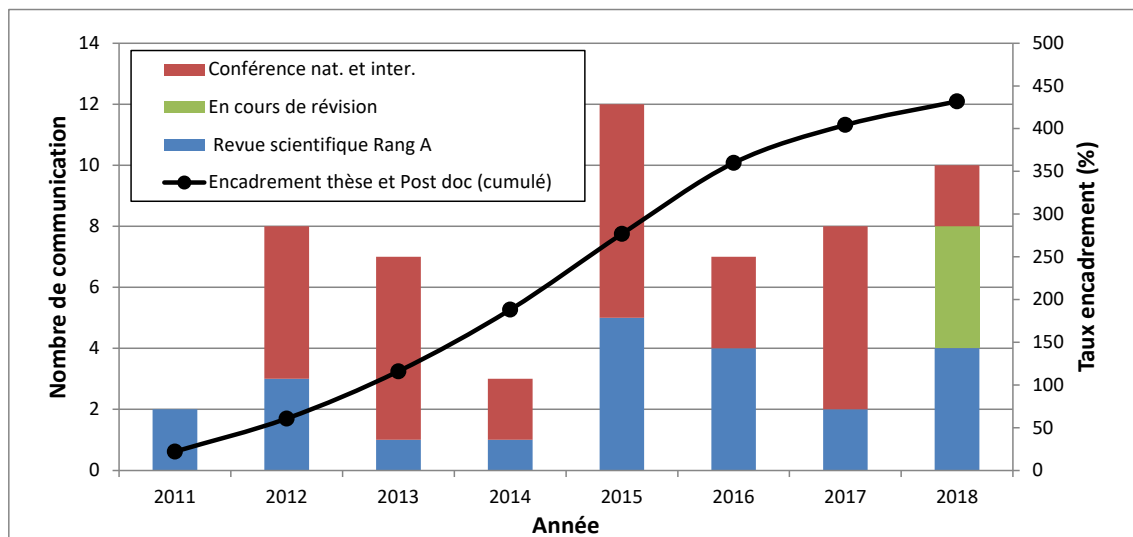


Figure 2. Evolution de mon taux d'encadrement et de ma production scientifique (Bilan au 15/03/2018)

Tableau 1. Bilan quantitatif de ma production scientifique et des activités contractuelles (\* source WOS, 15/03/2018)

Nombre de thèse soutenues	<b>10</b>		
Nombre de post doc encadrés	3 (total 24 mois)		
Revue de Rang A*	18		
h-index*	6		
Nombre de citations*	119 (109 sans auto-citations)		
Activités contractuelles depuis 2011	Implication	Scientifique	Administrative
	Montant (k€)	(1 = faible ; 3 = forte)	
Contrat IRSN (2010 - 2013)	96	2	1
Contrat DGA / CEA (2008-2013)	714	2	1
Projet Macena (2013-2017)	373	3	3
Contrat Andra (2014-2017)	125	3	3
Projet Grenoble innovation recherche (2013)	15	3	3
Contrat Cifre (2011-2014)	36	3	2
Chaire Pereniti (2013-2018)	1500	2	1

**II. Bilan de 6 années de recherche**

[Sachez vous éloigner car, lorsque vous reviendrez à votre travail,  
votre jugement sera plus sûr]  
**Léonard De Vinci**

## II.1 Comportement HM du béton

Le comportement hydromécanique du béton anime la communauté scientifique depuis plusieurs décennies (plus de 120 références sur WOS en utilisant les mots clés « concrete » et « hydro-mechanical » au 15/03/2018). S'il est évident que l'eau joue un rôle majeur lors de la réaction d'hydratation du ciment donnant naissance à la prise du béton conférant à celui-ci un certain nombre de ses caractéristiques notamment mécaniques, mes recherches s'articulent ici autour de l'eau non chimiquement liée en suivant la méthodologie de la Figure 3.

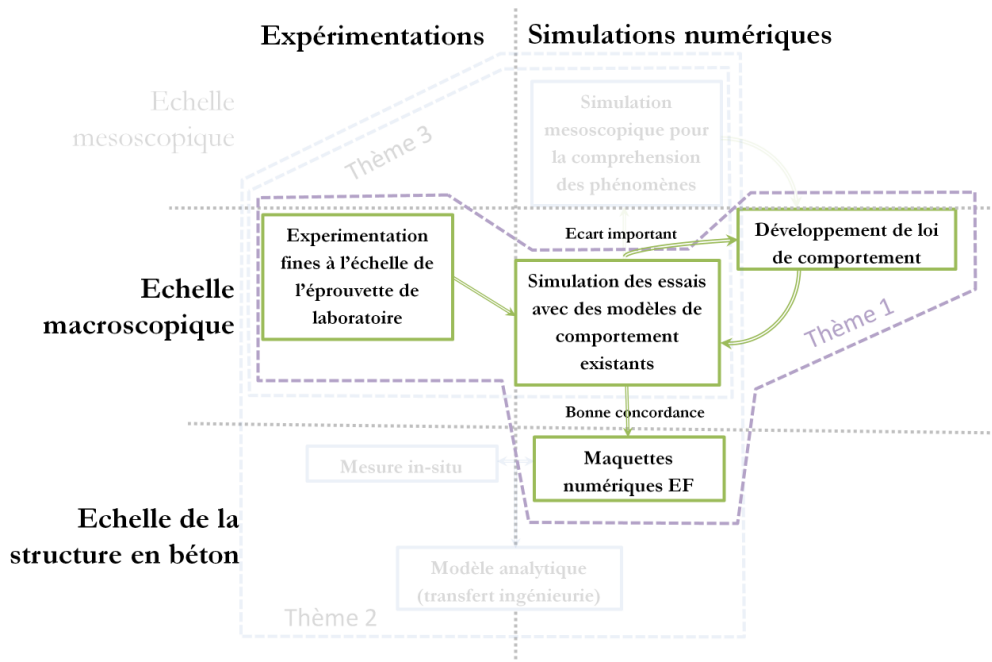


Figure 3. Méthodologie de la thématique *Comportement HM du béton*

Bien que ne faisant pas partie de la matrice cimentaire, l'eau dite libre a une influence notable sur les caractéristiques mécaniques du béton dès lors que celui-ci est sollicité de manière rapide ou sous très fort confinement (chargement triaxial et/ou déviatoire). Ces deux états mécaniques se retrouvent dans un élément de béton lors d'une sollicitation de type impact et la réponse de celui-ci sera par conséquent sensible à son taux de saturation. Il faut cependant garder à l'esprit que le taux de saturation dépend entre autres de la quantité de porosité qui évolue lors de sollicitations de type triaxial et/ou déviatoire et qu'il convient de le prendre en compte. Ainsi, dans ce cas nous pouvons parler de couplage fort.

Le deuxième volet du comportement hydromécanique concerne la capacité du béton à être traversé par un fluide (perméabilité relative à l'eau et/ou à l'air). Cette capacité de transfert est au cœur de plusieurs problématiques liées aux structures massives en béton. D'une part, les structures massives sont saturées (ou quasiment saturées) à leur état initial et le départ d'eau du cœur du béton vers le milieu extérieur provoque un gradient de déformation et une possible fissuration. Pour étudier ce type de transfert, une modélisation fortement couplée semble nécessaire car la fissuration modifie les possibilités de transferts hydriques et fera l'objet de perspectives aux travaux décrits dans ce chapitre.

D'autre part, pour les structures ayant un rôle de confinement notamment, il est également intéressant de pouvoir estimer la capacité d'une paroi à contenir un fluide sous forme

gazeuse. Cette capacité dépend du réseau poreux et de son état de saturation mais également de l'état de fissuration de l'élément de béton. En faisant l'hypothèse que l'état mécanique et hydrique du matériau ne dépendent pas de la quantité de fluide ayant percolé, il est possible d'étudier par le biais d'un couplage faible ou d'un chainage l'influence de l'état mécanique du béton sur sa capacité de transfert.

En m'appuyant sur des résultats scientifiques récents, ce premier chapitre expose les méthodologies adoptées pour progresser sur la compréhension du comportement hydromécanique selon les deux volets précités ainsi que l'enchaînement des différentes études pour en expliquer la cohérence globale.

Tableau 2. Publications et thèses associées du chapitre *Comportement HM du béton*

Nombre de thèses	Nombre de publications (rang A) / publications soumises / conférences
4	5 / 2 / 9
	Revue : Cement and Concrete Research, International Journal of Impact Engineering, Experimental Mechanics, Science and Technology of Nuclear installations International journal of numerical and analytical methods in geomechanics /Cement and Concrete Research, International journal of numerical and analytical methods in geomechanics

SOMMAIRE DU CHAPITRE « COMPORTEMENT HM DES BETONS »

II.1.1	COUPLAGE FORT EN DYNAMIQUE ET/OU FORT CONFINEMENT	15
II.1.1.1	Influence de l'eau libre sur le comportement triaxial des bétons	15
II.1.1.2	Prise en compte de l'eau libre dans la modélisation du comportement du béton sous impact : ED vs EF.	17
II.1.2	COUPLAGE FAIBLE	22
II.1.2.1	Transfert gazeux pré et post rupture	22

### II.1.1 Couplage fort en dynamique et/ou fort confinement

Lorsqu'une structure est soumise à une sollicitation de type impact (chargement dynamique extrême), le matériau constituant la structure subit des états mécaniques complexes. Au niveau de l'impacteur se développe une compression confinée alors qu'en face inférieure (opposée à l'impacteur), une traction est générée avec des vitesses de déformations importantes [Sukas, 1992] [Bailly *et al.*, 1996] [Gran et Frew, 1997]. Le comportement triaxial de compression du béton qui conditionne la pénétration de l'impacteur est une thématique de recherche historique de l'équipe de recherche que j'ai intégrée. En effet, depuis 2004 et en collaboration étroite avec le CEA Gramat (anciennement DGA), le laboratoire est équipé d'une presse triaxiale de grande capacité qui permet de solliciter des échantillons de béton décimétrique jusqu'à des pressions de confinement de l'ordre du GPa. Par ailleurs, depuis le début des années 2000, l'équipe travaille sur des modélisations de type EF et/ou ED pour simuler le comportement d'une structure en béton (armé) soumise à un impact.

#### II.1.1.1 Influence de l'eau libre sur le comportement triaxial des bétons

Si les différentes phases du comportement du béton sous fort confinement (élasticité, plasticité, durcissement) et le comportement volumique général (contractance puis dilatance) sont connus depuis les années 2000 grâce aux travaux de Z. Bazant [Bazant *et al.*, 1986], N. Burlion [Burlion, 1997][Burlion *et al.*, 2001][Yurtdas *et al.*, 2004] et Schmidt [Schmidt 2003][Schmidt *et al.*, 2009], les études passées sur la presse GIGA avant mon arrivée au laboratoire [Gabet *et al.*, 2006] [Gabet *et al.*, 2008][Piotrowska *et al.*, 2014][Piotrowska *et al.*, 2016][Vu *et al.*, 2009a &b] [Vu *et al.*, 2011][Poinard *et al.*, 2010] ont permis de montrer qu'en cas de confinement élevé, le béton se comporte comme un empilement granulaire non cohésif, sur lequel la résistance de la matrice cimentaire du béton sain ne semble pas exercer d'influence. Le béton devient insensible à la résistance à la compression uniaxiale (non confinée) qui est donc un mauvais indicateur de la réponse mécanique à haute pression du béton. Directement lié à la résistance en compression non confinée, le rapport E/C semble également avoir peu d'effet sur son comportement triaxial, pour une résistance à la compression comprise entre 21 et 57 MPa, sans adjuvant [Vu *et al.*, 2009a]. D'un autre côté, des premiers essais sur béton sec et saturé semblaient montrer une forte influence du taux de saturation, en particulier sur la capacité de résistance déviatoire du béton et la rigidité volumétrique [Vu *et al.*, 2009b].

La confirmation et l'extension de ces résultats à des bétons présentant des distributions de porosité différentes (cf. Figure 4) et à des taux de saturation intermédiaires (cf. Figure 5) afin de construire des modèles de comportement qui reposent sur des observations physiques ont été réalisés dans le cadre de la thèse de L. Zingg (encadrement MB : 33%, co-encadrée par J. Baroth et dirigée par Y. Malécot). La méthodologie adoptée consistait à conserver le squelette granulaire du béton des études précédentes (OC : béton ordinaire) et à modifier la constitution de la matrice cimentaire pour obtenir un béton haute performance (HPC) à faible porosité capillaire et un béton à faible performance (LPC) avec une porosité d'air entraînée plus élevée. L'étude du comportement du béton ordinaire (OC) pour des états partiellement saturés a nécessité le développement d'enceintes de conservation à humidité relative contrôlée ainsi que d'un capteur de déformations radiales



optimisé par simulations numériques EF. Mon apport personnel s'inscrit plus particulièrement sur ces deux développements expérimentaux ainsi que sur l'analyse des résultats obtenus sous sollicitations triaxiales et à la proposition (en collaboration avec l'équipe encadrante de la thèse de L. Zingg) d'explications physiques liées au comportement hydromécanique et à la distribution du réseau poreux du béton. La présence d'eau dans le réseau poreux conduit à atteindre le point de consolidation plus précocement (la porosité vide est plus rapidement compactée). Ainsi, d'une part la rigidité apparente augmente car l'eau est mise sous pression et on mesure la rigidité du squelette solide et de l'eau et d'autre part la résistance déviatoire diminue (la résistance au cisaillement du squelette solide et du réseau poreux rempli d'eau est plus faible que la résistance au cisaillement du squelette solide compacté). Cette influence est donc plus marquée sur les bétons ordinaires ou fortement poreux que sur les bétons hautes performances (cf. Figure 6) pour lesquelles la microstructure est plus fine et par conséquent nécessite des états de contraintes plus élevés pour être compactée.

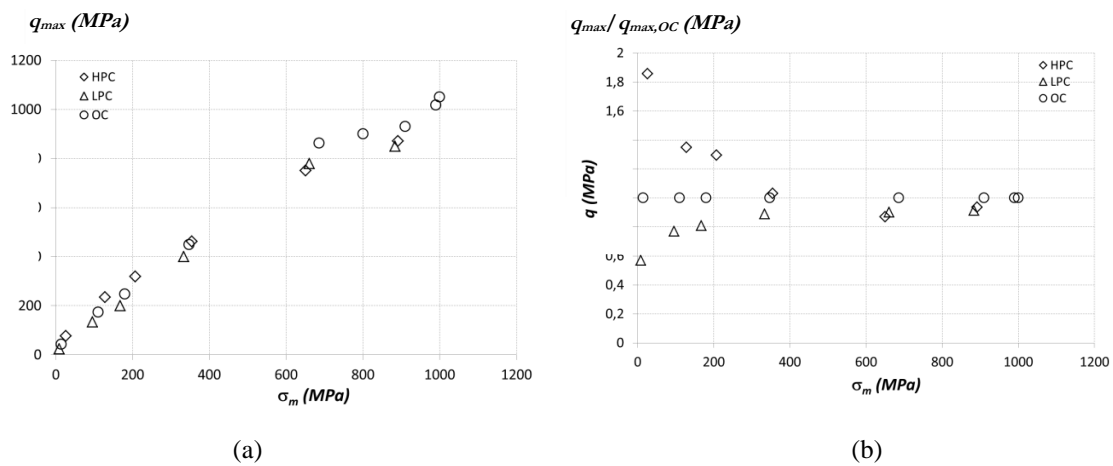


Figure 4 : (a) Courbes d'états limites de la contrainte déviatorique maximale  $q_{max}$  en fonction de la contrainte moyenne  $\sigma_m$  (b) Courbes d'états limites normalisées par rapport à la contrainte déviatorique maximale du béton ordinaire (OC) -  $q_{max}/q_{max,OC}$  en fonction de la contrainte moyenne  $\sigma_m$  [Zingg *et al.*, 2016]

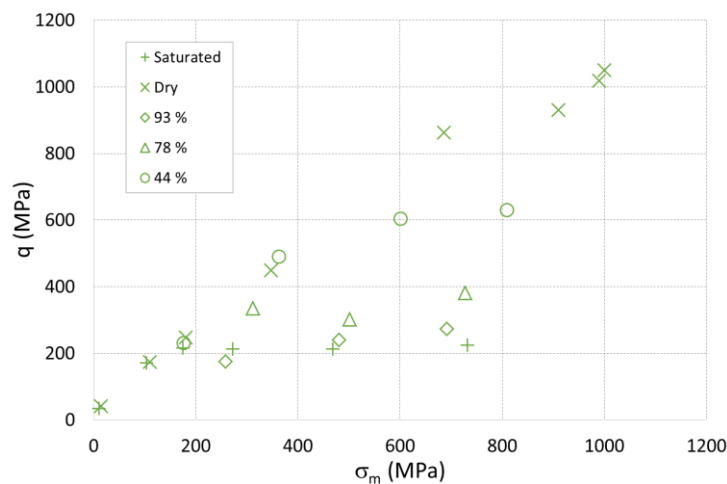


Figure 5 Influence de l'état de saturation sur la courbe d'états limites de la contrainte déviatorique  $q_{max}$  en fonction de la contrainte moyenne  $\sigma_m$  pour un béton ordinaire [Zingg *et al.*, 2016].

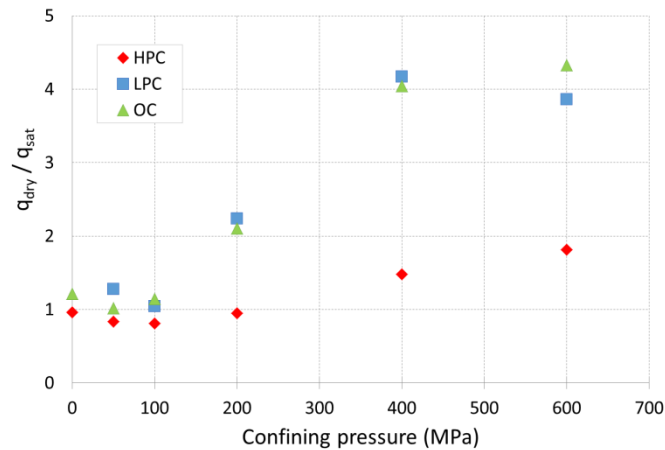


Figure 6 Influence de la porosité sur les états limites des bétons sec normalisé par la résistance déviatorique du béton saturé -  $q_{max,dry}/q_{max,sat}$  en fonction de la pression de confinement  $p$ , pour 3 bétons (LPC, OC, HPC) [Zingg, 2013].

#### II.1.1.2 Prise en compte de l'eau libre dans la modélisation du comportement du béton sous impact : ED vs EF.

L'influence de la porosité des bétons et de son taux de saturation sur la réponse du béton soumis à un chargement triaxial étant importante, celles-ci doivent être prise en compte dans la modélisation d'un élément de structure soumis à un chargement de type impact. En effet, la diminution de la résistance déviatorique du matériau conditionne fortement la capacité de pénétration du projectile. En utilisant deux approches numériques différentes (les éléments discrets et les éléments finis), nous avons mis en évidence l'intérêt et certaines limites de ces deux méthodes pour la prise en compte de l'eau libre dans le béton avec pour objectif de développer une méthode capable de reproduire les résultats expérimentaux à l'échelle de l'éprouvette de laboratoire et de l'élément de structure.

L'approche EF consistait à améliorer le modèle PRM couplé afin de reproduire le comportement du béton sous différents trajets de chargement et à différents niveaux de confinement, en tenant compte notamment du degré de saturation dans le béton. Le modèle « PRM » (Pontiroli-Rouquand-Mazars) couplé [Pontiroli *et al.*, 2010] est un modèle reposant sur le couplage entre un modèle d'endommagement permettant la description des mécanismes de dégradation et de fissuration du béton à faible confinement et un modèle de plasticité permettant de simuler le comportement du béton sous fort confinement.

C'est un modèle explicite qui reproduit le phénomène d'endommagement unilatéral à faible confinement (modèle PRM) ainsi que la compaction non-linéaire et la plasticité à fort confinement (modèle d'élasto-plastique KST [Krieg, 78][Swensson et Taylor, 83]). Le couplage confère au modèle une bonne aptitude à reproduire la réponse du matériau sous une large gamme de sollicitations.

Dans ce modèle, l'effet de la saturation était d'ores et déjà pris en compte en utilisant la notion de contrainte effective (théorie des contraintes effectives développée par Terzaghi [Terzaghi, 1925] pour les roches saturées) est utilisée afin de prendre en compte l'influence du taux de saturation sur la réponse du béton sous forts confinements. La méthode d'intégration proposée par [Mariotti *et al.*, 2003] pour les géo-matériaux saturés est utilisée dans le modèle KST. Sans revenir de manière exhaustive sur les détails du modèle, la

(a) (b)  
 Figure 7 permet de comprendre comment le taux de saturation est pris en compte dans les simulations.

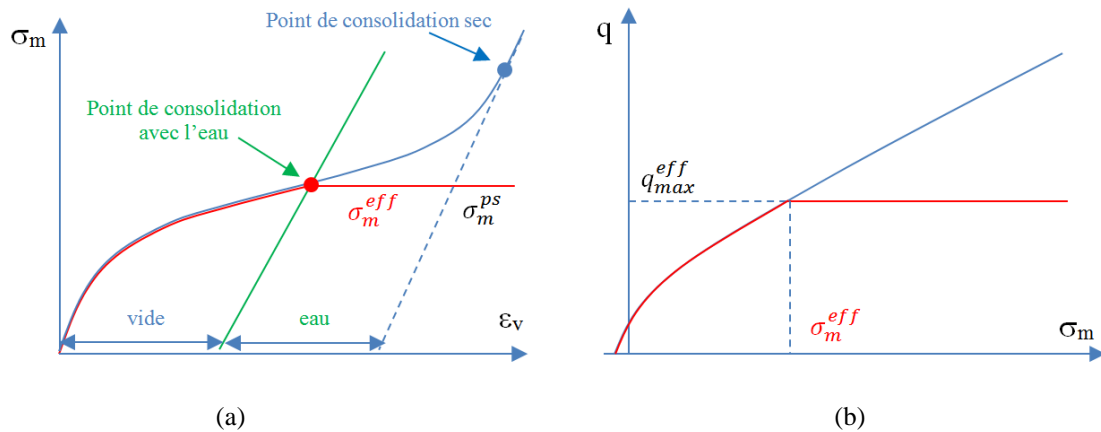


Figure 7 : Prise en compte du taux de saturation dans le modèle PRM couplé : comportement volumique (a) Seuil de contrainte déviatorique (b)

Après avoir identifié des limites importantes du modèle, trois améliorations principales ont été proposées dans la thèse de D.H.Vu (encadrement MB : 33%, co-dirigée par L. Daudeville et Y. Malécot). Les plus importants portaient sur :

- La prise en compte de la contrainte déviatoire sur le comportement volumique du béton. Cette modification a eu une influence également sur le comportement axial.
- L'amélioration de la prise en compte de l'eau et de la contrainte effective en s'appuyant sur un modèle poro-mécanique. La pression de l'eau est toujours calculée par l'équation de Mie-Gruneisen.

La prise en compte de la contrainte déviatoire consiste à utiliser une combinaison de la courbe hydrostatique et de la courbe oedométrique pour déterminer la déformation volumique.

Les résultats des essais expérimentaux obtenus sur un béton sec, saturé et à des degrés de saturation intermédiaire ont ensuite été utilisés pour identifier les paramètres de ce modèle (Figure 8).

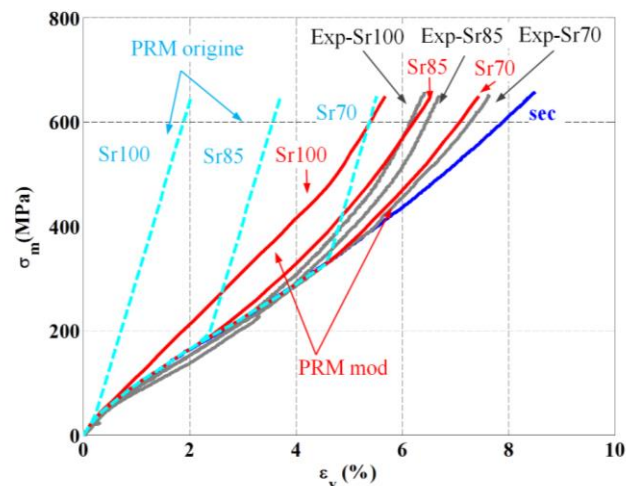


Figure 8 : Performance du modèle PRM couplé après modifications

En prenant en compte les effets de vitesses sur le comportement en traction, en maillant les armatures avec des éléments 1D et un modèle élasto-plastique écrouissant et en utilisant une technique de régularisation de type Hillerborg pour le béton [Hillerborg *et al.*, 76], ces améliorations ont été validées et vérifiées par confrontation des résultats numériques obtenus sur des dalles en béton armé sous impact avec les résultats des essais (cf. Figure 9)

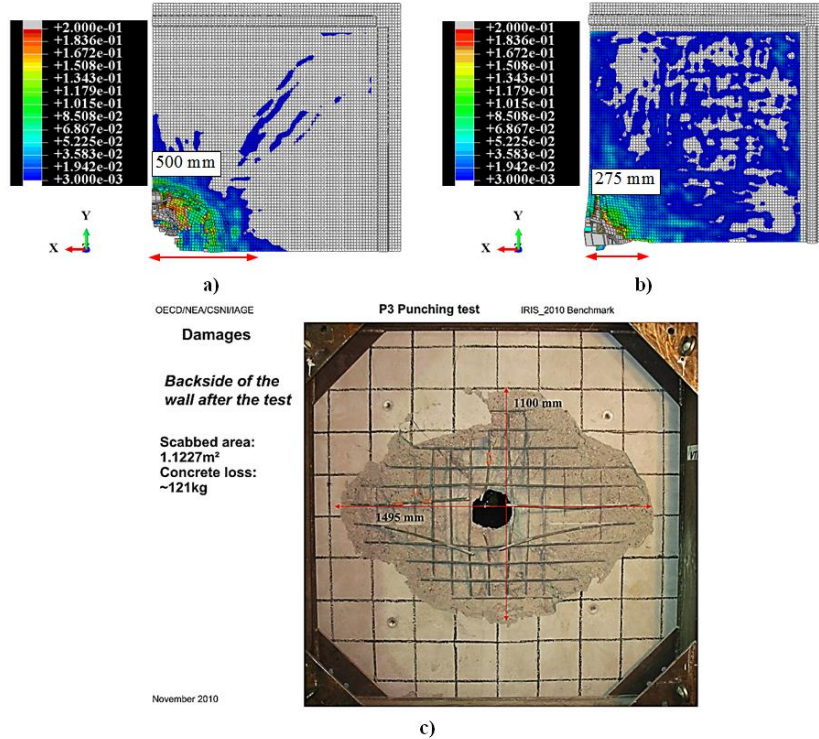


Figure 9 : Vue de la déformation principale maximale sur la face arrière à la fin de la simulation - Comparaison avec la face arrière de la dalle du test de perforation a) Nouveau modèle PRM couplé, b) Modèle PRM couplé original, c) Essai

L'apparition des discontinuités (fissures) suivie d'une fragmentation d'un élément de béton est difficile à traiter à l'aide de simulations EF. Celle-ci est plus aisée à mettre en œuvre en utilisant des ED car il suffit de supprimer l'interaction entre les points concernés. Le laboratoire possède une longue expérience dans l'utilisation des ED pour la modélisation du comportement des milieux granulaires secs (sans être exhaustif, on pourra se reporter aux travaux de F. Donzé [Sibille *et al.*, 2008][Kozicki et Donzé 2008] [Donzé et al., 2009] et/ou B. Chareyre [Smilauer et Chareyre, 2010]) et partiellement saturés [Catalano, 2012] ou pour la modélisation des milieux cohésifs (on pourra par exemple se reporter aux travaux de [Hentz *et al.*, 04] ou plus récemment [Omar, 2015]). La prise en compte de l'état de saturation sur le comportement des bétons lors d'un impact par le biais de l'utilisation d'éléments discrets qui sont particulièrement adaptés aux milieux granulaires mais peuvent également être utilisés pour traiter la fragmentation des milieux continus semblait donc naturelle. En effet, à l'échelle macroscopique, une structure peut être supposée homogène et continue, mais son comportement à la rupture résulte de phénomènes discontinus. Dans de tels cas, les méthodes discrètes sont plus adéquates que les approches continues classiques pour modéliser et reproduire ces phénomènes.

Même si contrairement à l'utilisation classique des éléments discrets et pour avoir un comportement du béton post pic plus réaliste (adoucissement), nous considérons des

interactions à distance, le comportement de l'assemblage d'éléments discrets dépend de la nature des liens. Une loi élastique endommageable est utilisée en traction alors qu'en compression, une loi tri linéaire est utilisée pour reproduire les phénomènes de compaction puis de durcissement. En cisaillement, le comportement est élastique jusqu'à une surface seuil qui dépend de l'état d'endommagement du lien (cf. Figure 10).

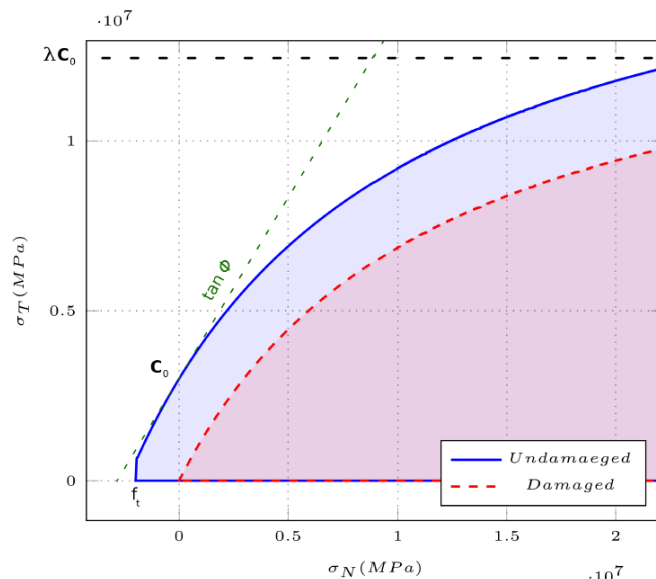


Figure 10 : Surface seuil en cisaillement du modèle ED (en Pa)

Comme pour le modèle EF, la prise en compte du taux de saturation repose d'une part sur la modification du comportement en compression après avoir atteint le point de compaction qui dépend du taux de saturation et d'autre part sur la modification de l'asymptote horizontale qui définit la surface seuil en cisaillement.

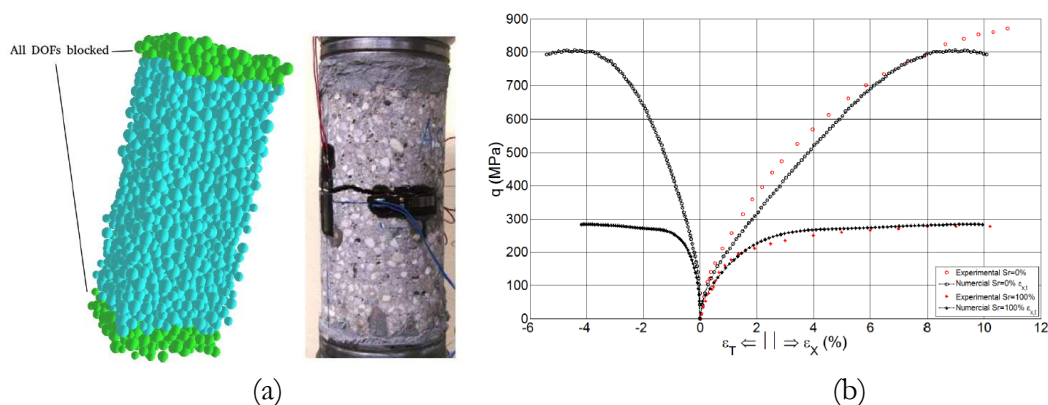


Figure 11 : Essai triaxial sur béton, éprouvette réelle et maillage associé (a), Comparaison mesure / simulation pour la phase déviatoire à une pression de confinement de 600 MPa et un degré de saturation de 100% ou 0%

Comme le montre les résultats obtenus dans la thèse de H. Benniou (encadrement MB : 33%, co-dirigée par L. Daudeville et Y. Malécot), à l'échelle de l'éprouvette, ces modifications permettent de reproduire correctement les résultats expérimentaux pour des confinements élevés à différents niveaux de saturation (cf. Figure 11). A l'échelle de la structure, en prenant en compte l'effet de vitesse pour la modification du comportement en traction, les résultats en terme de vitesse de pénétration montrent que l'effet est faible pour des dalles peu épaisses (30 cm) ou des vitesses initiales faibles mais non négligeables pour



des dalles plus épaisses (cf. Figure 12). Néanmoins ces résultats restent qualitatifs car la comparaison avec des résultats sur des dalles épaisses n'est pas possible par manque de données expérimentales.

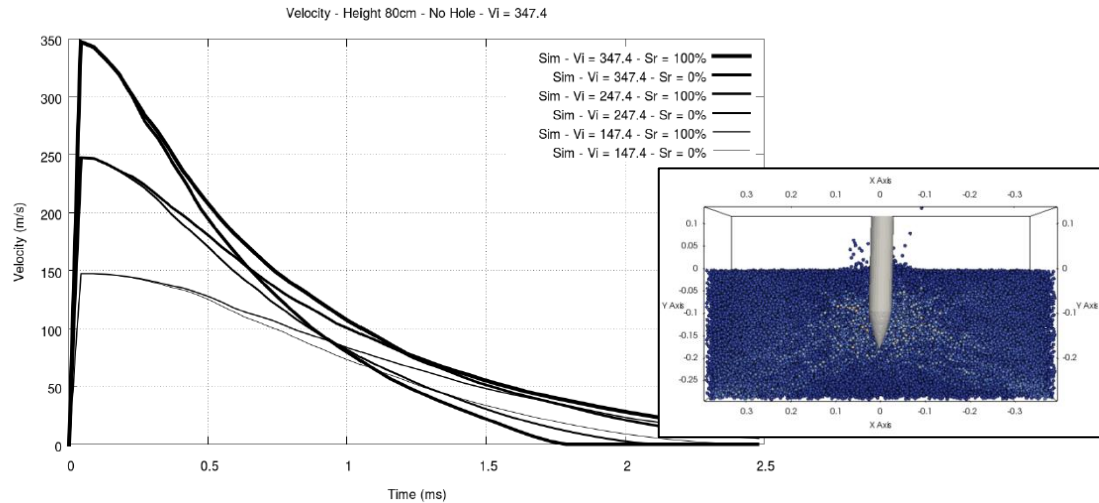


Figure 12 : Evolution de la vitesse du projectile lors de la pénétration dans une dalle de béton

La prise en compte du taux de saturation dans un calcul de type impact par éléments finis ou par éléments discrets repose sur des outils numériques complexes pour lesquels je n'avais que peu de compétences et je ne suis pas devenu un expert en simulation en dynamique rapide à travers ces deux actions de recherche. En effet, mon apport scientifique se situe au niveau de la compréhension du comportement du matériau sous confinement triaxial pour un matériau saturé ou partiellement saturé (compétence acquise au travers de la thèse de L. Zingg) afin d'adapter les lois de comportement utilisées pour les développements numériques. Pour l'intégration de ces lois dans les codes de calculs EF ou ED, je me suis appuyé sur l'expertise de L. Daudeville et Y. Malécot. Néanmoins, cette expérience m'a permis de m'intégrer à une thématique forte de l'équipe RV mais également d'acquérir les connaissances de bases permettant de dialoguer avec des experts du domaine et pouvoir éventuellement mener à bien un projet dont une partie serait réalisée à l'aide d'ED en collaboration avec ceux-ci.

### Analyse critique

Les éléments discrets ont un avantage certain vis-à-vis des phénomènes de fragmentation et de perforation alors que les éléments finis sont plus efficaces pour la prise en compte du vieillissement du béton et pour la modélisation des armatures. D'autre part, la bonne concordance entre les simulations éléments finis et les essais d'impacts dépendent fortement du critère d'érosion choisi qui reste une variable d'ajustement rendant les simulations peu prédictives (ou du moins dont on ne peut assurer la nature prédictive). Dès lors, un couplage des deux méthodes initialement proposées par L. Daudeville, E. Frangin et J. Rousseau [Frangin, 2008][Rousseau *et al.*, 2008][Rousseau *et al.*, 2009] en espace et en temps offre une perspective intéressante à ces travaux. Néanmoins, le calcul de la déformation volumique permettant la prise en compte du taux de saturation (ou la pression d'eau une fois la porosité remplie d'air compactée) à partir de lois unidimensionnelles et d'interaction à distance reste discutable. Par ailleurs, la possibilité d'avoir une migration de

L'eau des zones fortement sollicitées et compactées vers des zones moins sollicitées n'a pas été abordée ici pour en quantifier l'influence.

A partir des différentes critiques que j'ai faites des modèles, je pourrais développer certaines perspectives. Néanmoins, j'ai depuis la fin de la thèse de H. Benniou sensiblement diminué mon activité sur cette thématique pour d'une part me consacrer aux autres thématiques que je développerai dans la suite de ce manuscrit et d'autre part car je pense que les autres perspectives sont principalement numériques, mis à part la réalisation d'essais d'impacts sur des dalles à différentes teneur en eau qui nécessiteraient des moyens expérimentaux extrêmement importants. Si, la prise de leadership sur des actions purement (ou principalement) numériques en dynamique ne fait pas partie de mes ambitions futures, la démarche globale consistant à construire des modélisations basées sur des observations physiques issues d'expérimentations fines à l'échelle de l'éprouvette de laboratoire et d'en déduire les influences à l'échelle de la structure par simulation numérique (après validation du modèle à l'échelle de l'éprouvette de béton) est une méthodologie caractérisant ma capacité à faire dialoguer les analyses expérimentales et numériques.

## II.1.2 Couplage faible

### II.1.2.1 Transfert gazeux pré et post rupture

Lorsqu'un élément de béton est fissuré (ou fragmenté) des suites d'une sollicitation de type impact ou de sollicitations moins violentes mais supérieures à la résistance de l'élément, la possibilité de quantifier les transferts de fluides à travers une paroi ou un élément de béton devient essentielle pour l'étude des ouvrages en béton (armé et/ou précontraint) et notamment lorsque la fonction première de l'ouvrage est le confinement (barrages, tunnels sous nappe phréatique, enceintes de confinement). Lorsque le matériau n'est pas endommagé, la capacité du matériau à être traversée par un fluide dépend essentiellement des caractéristiques du milieu poreux (connectivité, constrictivité, tortuosité,...) et de son taux de saturation. Lorsqu'une macro-fissure apparaît, celle-ci devient un canal préférentiel pour le fluide et si celle-ci est très ouverte, une partie prépondérante du débit de fuite passera par cette macro-fissure (si traversante).

Si une fois que la fissure est ouverte, une loi de Poiseuille modifiée pour prendre en compte la rugosité et la tortuosité de la fissure est prédictive, pour des ouvertures faibles ou des endommagements plus diffus qu'une macro-fissure, les modèles ne sont pas toujours pertinents.

Une des difficultés principales réside dans la prévision de l'évolution du débit de fuite lors de la transition entre ces deux états (endommagement diffus et fissures localisée). Dans le cadre du projet post-Fukushima nommé MaCEnA (Maîtrise du Confinement d'une Enceinte en Accident grave) dont j'étais responsable partenaire pour le laboratoire 3SR (Budget total du projet : 1,7M€, 9 partenaires, budget 3SR : 377k€) j'ai participé à la proposition de développement de modélisations prenant en compte le couplage entre l'état mécanique du matériau et la perméabilité. En reprenant la même méthodologie que dans le sous-chapitre précédent à savoir l'utilisation d'expérimentations fines à l'échelle de l'éprouvette de laboratoire pour le développement de modèles de comportement mais en se basant cette fois-ci sur des essais de fendage/débit de fuite réalisés en 2007 à Nantes par M. Choinska et F. Dufour, deux types d'approches ont été envisagées et confrontées à des résultats expérimentaux.

A partir d'un état mécanique donné, nous avons développé deux approches basées sur un modèle d'endommagement non-local s'appuyant sur l'état de contraintes [Giry *et al.*, 11]. Dans la première approche dite semi-discrète le calcul du débit de fuite se fait grâce à une estimation de l'ouverture de fissure [Dufour *et al.*, 08] et l'utilisation d'une loi de type Poiseuille. Le tenseur de perméabilité moyen  $\mathbf{K}_m^e$  est donné par l'équation ci-dessous. Ce tenseur est calculé pour chaque élément fini dans son repère local où  $\mathbf{n}^e$  est le vecteur unitaire qui correspond à la direction normale au chemin de fissure,  $\xi_w$  est le coefficient permettant de prendre en compte la rugosité et la tortuosité de la fissure à l'échelle plus fine et dépendant de l'ouverture de fissure [Rastiello *et al.*, 2014].

$$\mathbf{K}_m^e = \begin{bmatrix} k_0 & 0 & 0 \\ 0 & k_0 + \xi_w \frac{[w_X^e]^3}{12 l^e} & 0 \\ 0 & 0 & k_0 + \xi_w \frac{[w_X^e]^3}{12 l^e} \end{bmatrix}_{(X,Y,Z)}$$

Dans la seconde approche dite continue, l'ouverture de fissure n'est pas calculée et la perméabilité est directement exprimée en fonction de la déformation issue du calcul d'endommagement. Par ailleurs, une estimation de l'ouverture de fissure est également réalisée toujours à partir de la déformation qui devient alors une variable intermédiaire pour calculer le coefficient permettant de prendre en compte la rugosité et la tortuosité. Dans ce cas, pour prendre en compte à la fois l'endommagement diffus et la présence d'une fissure localisée, une loi de raccordement est utilisée et le tenseur de perméabilité devient :

$$\mathbf{k}_G = (k_D)^{1-D} \times \begin{bmatrix} k_0 & 0 & 0 \\ 0 & k_0 + \xi_w \frac{[l^e * (\varepsilon_X - \varepsilon_{el})]^3}{12 l^e} & 0 \\ 0 & 0 & k_0 + \xi_w \frac{[l^e * (\varepsilon_X - \varepsilon_{el})]^3}{12 l^e} \end{bmatrix}_{(X,Y,Z)}^D$$

Sur l'exemple de l'essai brésilien, ces deux approches sont en termes de résultats à peu près équivalentes et offrent certains avantages par rapport aux modèles existants (par exemple et sans être exhaustif [Choinska *et al.*, 2007][Picandet, 2001][Gawin *et al.*, 2002]). En effet, même si l'endommagement est isotrope, le tenseur de perméabilité ne l'est plus et l'orientation locale de la fissure est retranscrite via le tenseur de déformation. Par ailleurs, même pour des éléments dont l'endommagement a atteint la valeur maximale  $D \sim 1$ , la perméabilité peut continuer d'augmenter (avec l'augmentation de l'ouverture de fissure).

Pour compléter la démarche, ces modèles doivent être validés sur des essais présentant d'autres configurations. Toutefois, la validation de ces approches sur d'autres modes de sollicitation ou sur des éléments de structures reste délicate. En effet, sur l'essai Brésilien, en adoptant un modèle non local SB et en utilisant un pilotage de la simulation en longueur d'arc, la partie mécanique est quasiment parfaitement reproduite (cf. Figure 13) et l'orientation de la fissuration est connue a priori. Pour des chargements plus complexes, on pourrait notamment penser aux essais de traction sur un tirant de béton armé [Demettré et Charron, 2012], ou aux essais réalisés à Karlsruhe sur une partie courante d'enceinte (PACE) [Niklasch et Herrmann, 2009], la concordance entre les expérimentations et les simulations numériques n'est pas acquise. D'une part parce que la mise en œuvre de



modèles non locaux basés sur l'état de contrainte est délicate et d'autre part parce que les données expérimentales sont parfois incomplètes. En outre, ces essais peuvent faire intervenir des modes de rupture qui ne sont pas uniquement en mode I. Il est donc difficile de conclure sur la validité et la nature prédictive de ces modèles. Néanmoins, la Figure 14 montre que les approches développées (SBNL : Stress based non local damage model ; SD : Approche semi discrète et MLstrain approche continue basée sur la déformation) donnent des résultats plus satisfaisants que les approches basées sur l'endommagement.

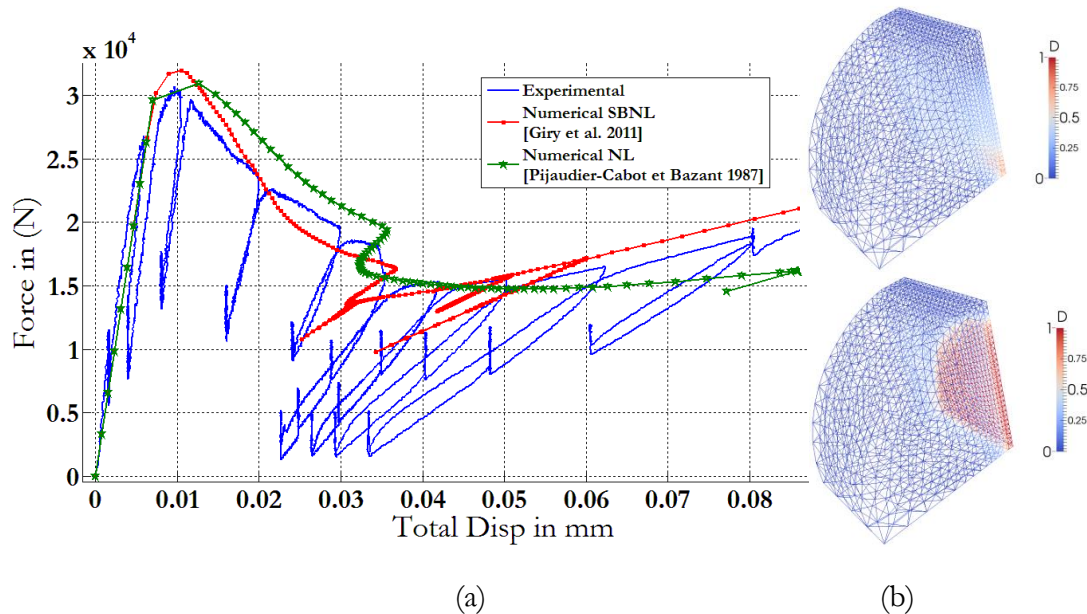


Figure 13. Comparaison des réponses mécaniques (force en fonction du déplacement horizontal d'un point proche de la lèvres de la fissure) lors d'un essai brésilien pour deux méthodes de régularisation non locales (a) propagation de l'endommagement pour le modèle SBNL (b)

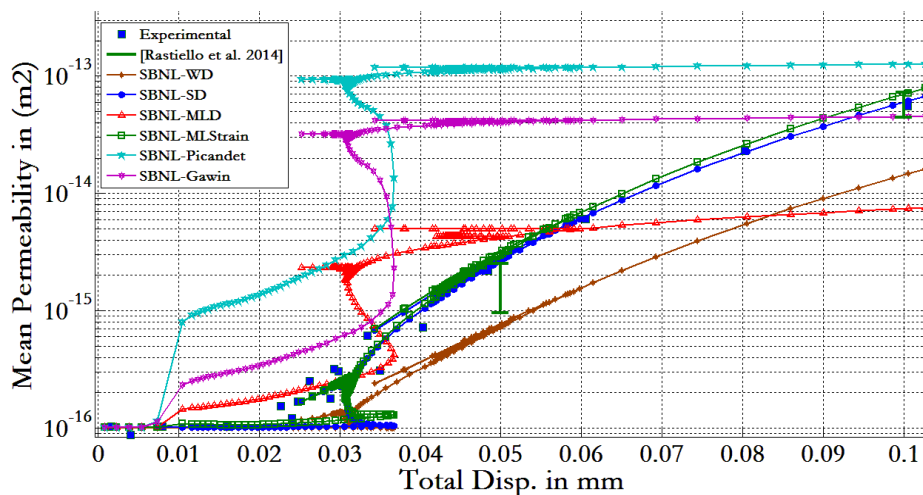


Figure 14. Evolution de la perméabilité moyenne en fonction du déplacement horizontal d'un point proche de la lèvres de la fissure selon différentes approches.

Ces approches semblent donc pertinentes en présence de modes de percolation majoritairement uni-axiaux (à la tortuosité de la fissure près). Toutefois, le chemin de percolation d'un fluide à travers un élément de béton armé peut être plus complexe

notamment lorsque la fissuration n'est pas traversante. En effet, dans ce cas, le transfert se fera par le chemin le plus facile d'accès et possiblement au niveau de l'interface acier béton ou à travers la porosité du béton. Pour étudier cette possibilité, j'ai participé au développement d'un dispositif permettant des mesures de la perméabilité longitudinale et radiale d'un échantillon de béton. Il est à noter qu'il s'agit de perméabilité résiduelle au gaz après une dessiccation à 80°C jusqu'à masse constante pour s'affranchir de l'effet de la saturation.

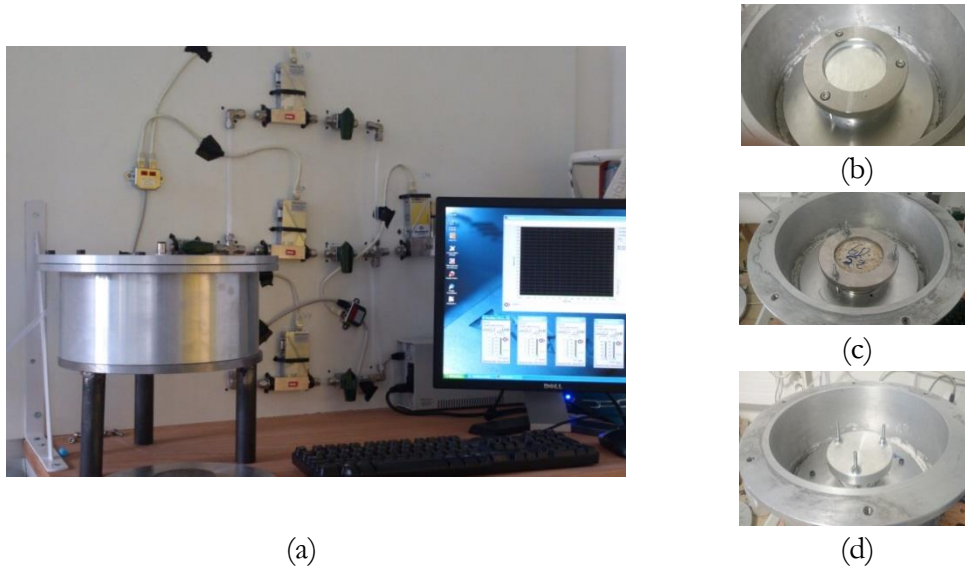


Figure 15 : Système de mesure de la perméabilité résiduelle, Essai d'étanchéité (a), mesure longitudinale (b) mesure radiale (c)

En profitant de l'expérience acquise par le laboratoire sur les essais d'interface acier béton dans le cadre de la thèse d'A. Tixier [Tixier, 2013] et du dispositif de mesure de débit, j'ai encadré la réalisation des essais de perméabilités/transferts au cours d'un essai de type push-in.

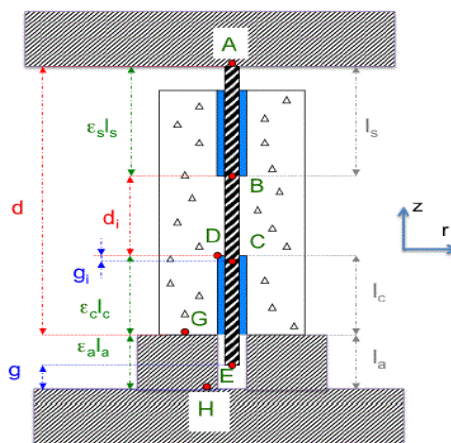


Figure 16 : Principe de l'essai Push-in [Tixier, 2013].

Après une légère augmentation du débit de fuite en phase pré-pic, une stabilisation s'opère et on observe un plateau perturbé mais sans hausse notable. Il faut attendre un

déplacement important pour voir une augmentation importante possiblement due à la coalescence d'une fissure ouverte.

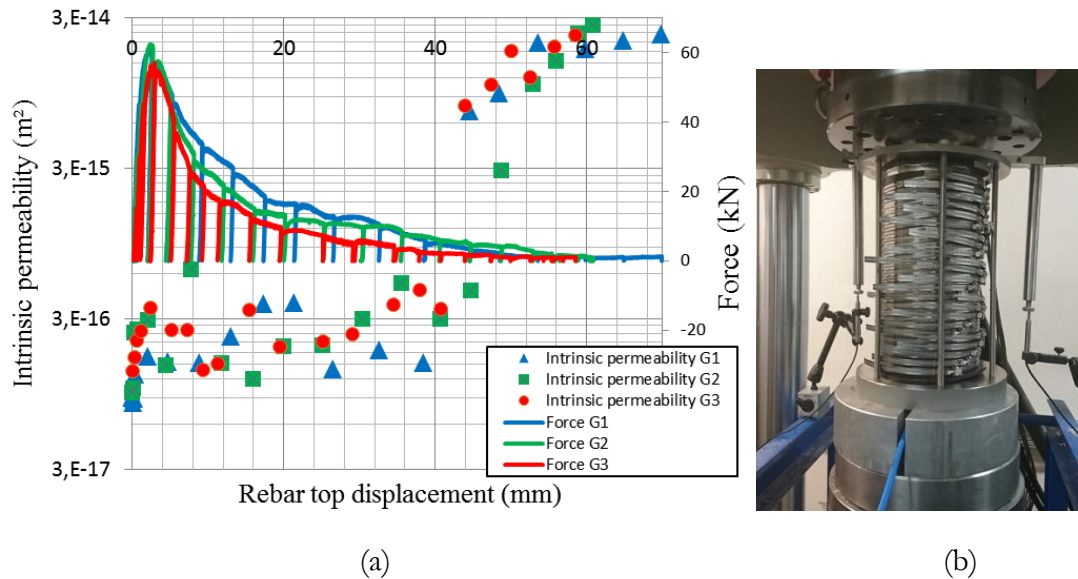


Figure 17 : Evolution des propriétés de transfert lors d'un essai de type Push-in

Les compétences et connaissances que j'ai apportées à ces études se focalisent essentiellement sur la partie expérimentale avec le développement d'un dispositif de mesure de perméabilité original permettant d'une part de limiter la pression de confinement nécessaire par rapport à certains autres dispositifs [Kollek, 1989][Meziani et Skoczylas 1999] et qui ne permettent pas d'avoir des mesures pour des matériaux endommagés et/ou de réaliser des mesures longitudinales et radiales. L'encadrement de la thèse de Mohamad El Dandachy (encadrement MB : 33%, co-dirigée par S. Dal Pont et F. Dufour) m'a permis d'accroître mes compétences sur l'utilisation des méthodes non locales pour la régularisation des modèles d'endommagement notamment avec l'utilisation d'un modèle non local basé sur l'état de contraintes ainsi que sur la modélisation des phénomènes de transferts hydrique dans les matériaux poreux. Cette dernière m'a permis de construire un sujet de thèse en vue d'obtenir une bourse ministérielle que je développerai dans la partie perspective (cf. paragraphe III.1.1.a).

### Analyse critique

Les perspectives à ce travail sont nombreuses et certaines sont déjà en cours de réalisation. Par exemple, la validation de lois proposées sur les résultats expérimentaux de la maquette PACE (partie courante d'enceinte) est en cours.

Les lois développées semblent bien adaptées au cas de sollicitations de type mode I et unidirectionnel mais seront certainement mises en défaut lors de sollicitations cycliques et/ou combinées. Cependant, la littérature manque d'essais de validation à l'échelle de l'éprouvette sous des sollicitations cycliques par exemple. Les seuls essais existant à ma connaissance parcourant une charge et une décharge complète sont les essais BIPÉDE [Gérard, 1996]. La réalisation de ce type d'essais de validation en y ajoutant une phase de compression après fissuration en traction permettrait d'augmenter le domaine de validité des lois de couplage. Par ailleurs, la conclusion sur la faible évolution de la perméabilité le

long d'une interface est à restreindre à la configuration étudiée qui n'est pas complètement représentative des défauts pouvant arriver sur site liés à un mauvais enrobage des armatures (armature perpendiculaire au coulage par exemple) ou à d'autres types d'inserts (câbles de précontrainte).

Bien que certains modèles basés sur un endommagement thermique existent [Vidal *et al.*, 2015], la prise en compte de l'influence de la température sur l'évolution de la perméabilité doit également être approfondie notamment pour permettre la prise en compte de la perte d'isotropie dans le cas de chargements couplés thermomécaniques [El Dandachy *et al.*, 2016]. A plus long terme, j'envisage l'utilisation de ces lois hydro-mécaniques pour les étendre à des sollicitations plus complexes, cycle de chargement (mode II par exemple), température, fluage,....

## II.2 Comportement différé des ouvrages en béton

Contrairement aux sollicitations évoquées au chapitre 1 qui concernent des situations accidentelles et des chargements de courtes durées, les ouvrages en béton subissent également des charges de longues durées en phase de service (phase de fonctionnement normal d'une structure). L'évolution des déformations des ouvrages avec le temps est un enjeu sociétal de premier ordre. En effet, comme exposé au chapitre précédent, d'une part, l'état de contrainte et donc de fissuration est essentiel pour la modélisation et l'analyse du taux de fuite d'une structure. Or, cet état de contrainte dépend fortement du comportement différé du matériau qui la constitue. D'autre part, sachant qu'une large part du patrimoine d'infrastructures nationales date d'au moins une trentaine d'années, les besoins en réhabilitations lourdes deviennent grandissants dans un contexte économique tendu. Il est donc primordial pour les maîtres d'ouvrages publics ou privés d'être en mesure de connaître l'état de santé de leurs ouvrages et leur devenir pour optimiser la maintenance. Outre le retrait de dessiccation qui se poursuit sur une longue période, le fluage des bétons peut également être à l'origine de désordres dans les structures en béton notamment liés à la diminution de la précontrainte au cours du temps. Ces déformations sont d'ailleurs, pour le cas des matériaux cimentaires, intimement liées à la présence d'eau au sein du réseau poreux. Les inspections régulières des ouvrages permettent de détecter certaines pathologies mais de manière relativement tardive. Pour pallier à cela et pour les ouvrages stratégiques, les maîtres d'ouvrages ont généralement recours à des systèmes d'auscultation permettant de connaître l'historique du comportement de l'ouvrage et de pouvoir détecter rapidement une anomalie de comportement.

Dans un premier temps, je développerai donc les études réalisées sous mon encadrement qui ont permis par le biais de maquettes numériques EF d'ouvrages d'apporter des éléments probants pour l'amélioration des systèmes de mesures in-situ et permettant une meilleure analyse des données. Dans ces deux études, la méthodologie adoptée est similaire (Figure 18). Avant de confronter les résultats numériques aux mesures in situ, une maquette numérique de l'ouvrage est développée (géométrie et CL) puis une calibration des paramètres des modèles est réalisée sur des essais de laboratoire ou sur des données issues de la littérature. Enfin, le modèle est soumis au chargement THM réel mesuré pendant la période de mesure pour offrir une comparaison objective.

La deuxième partie de ce chapitre visera à étudier l'évolution des propriétés mécaniques du béton avec le fluage. En effet, il est important de savoir si au-delà de la perte de précontrainte qui fragilise l'ouvrage d'un point de vue global, les performances des matériaux constituant l'ouvrage sont aussi localement amoindries.

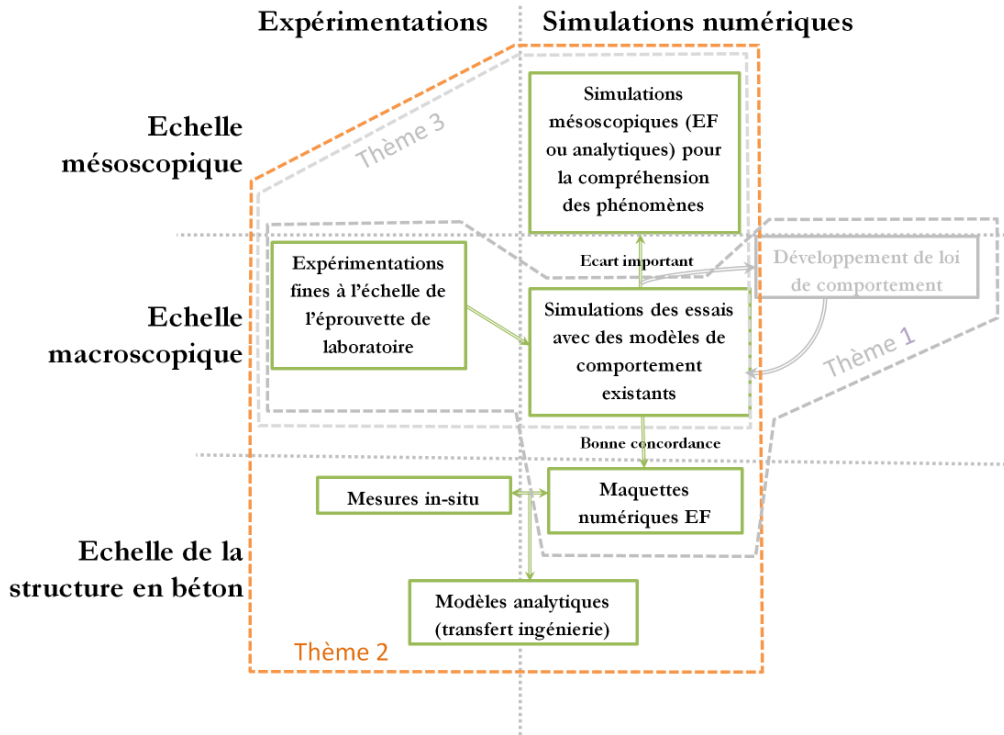


Figure 18. Méthodologie de la thématique *Comportement différé des ouvrages en béton*

Tableau 2. Publications et thèses associées du chapitre *Comportement différé des ouvrages en béton*

Nombre de thèses	Nombre de publications (rang A) / publications soumises / conférences
3	3 / 2 / 6
	Revue : Engineering Structures (2), European Journal of environment and Civil Engineering, Engineering mechanics / Engineering structures (1)

Sommaire du chapitre *Comportement différé des ouvrages*:

II.2.1	APPORT DES SIMULATIONS EF POUR L'AMELIORATION DES METHODES D'AUSCULTATION DES OUVRAGES	30
II.2.2	IMPACT DU FLUAGE SUR LA RESISTANCE DES BETONS	35

## II.2.1 Apport des simulations EF pour l'amélioration des méthodes d'auscultation des ouvrages

Les déplacements des barrages en béton sont influencés par de nombreux facteurs tels que la charge hydrostatique, les effets thermiques et les effets irréversibles. Pour interpréter les mesures, séparer les différentes influences et identifier un éventuel comportement pathologique (augmentation de la vitesse de fluage par exemple), des modèles physico-statistiques de type régression multi-linéaire sont couramment utilisés par l'ingénierie. L'estimation de la composante thermique reste cependant une source d'incertitude significative pour ces modèles. Le démarrage de la thématique liée à l'auscultation des ouvrages coïncide avec mon arrivée au laboratoire sous l'égide d'une collaboration avec la direction technique générale d'EDF (EDF-DTG basé à Grenoble).

La méthodologie consiste à soumettre une maquette numérique (cf. Figure 19) à des sollicitations connues pour obtenir des déplacements virtuels représentatifs de chaque type de sollicitations. En utilisant les modèles physico-statistiques existants, il est alors possible de mettre en évidence les mécanismes à l'origine des déplacements thermiques, de clarifier les hypothèses des modèles actuels et de déterminer les principales sources d'incertitudes parmi les influences environnementales afin de proposer des pistes d'amélioration de la modélisation statistique.

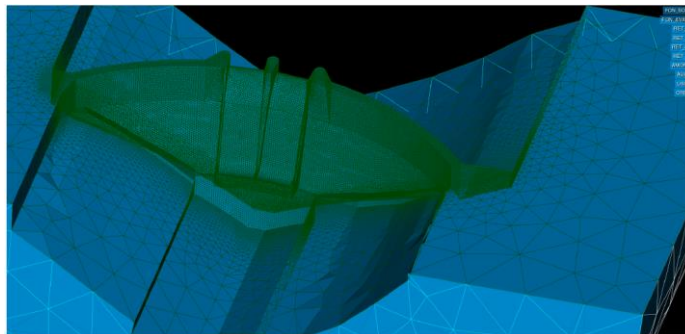


Figure 19 : maillage de la maquette numérique d'un barrage voûte

Les résultats des études menées sur deux types de barrage ayant des comportements différents (un barrage voûte et un barrage poids) montrent que la principale source d'incertitude sur les modèles physico-statistiques existants provient de la prise en compte de la température réelle de l'air et de la prise en compte de la température de l'eau contenue dans le réservoir (cf. Figure 20). En effet, bien que contrairement au modèle HST<sup>1</sup> [Ferry et Willm, 58][Willm et Beaujoint, 67][Lugiez *et al.*, 70], le modèle HSTT [Penot *et al.*, 2005] considère la température réellement mesurée (ou calculée par interpolation de station météorologique), le calcul analytique de la propagation de la chaleur dans le cœur du barrage pour calculer la température moyenne de celui-ci est trop simplifié pour être représentatif. Par ailleurs, la température de l'eau n'est pas prise en compte, alors que la surface de contact entre l'eau et la paroi amont du barrage est importante.

---

<sup>1</sup> Modèle physico-statistiques basés sur la somme de composantes réversibles (effet **H**ydrostatique et **S**aisonnier) et d'une composante irréversible dépendante du **T**emps.



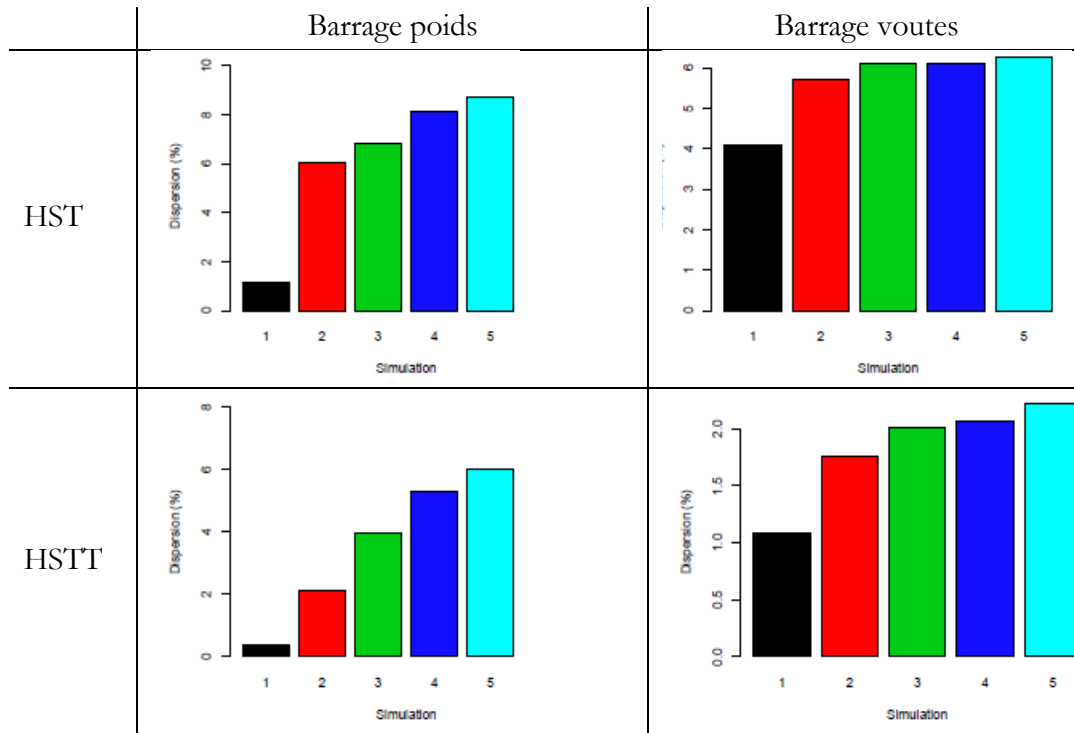


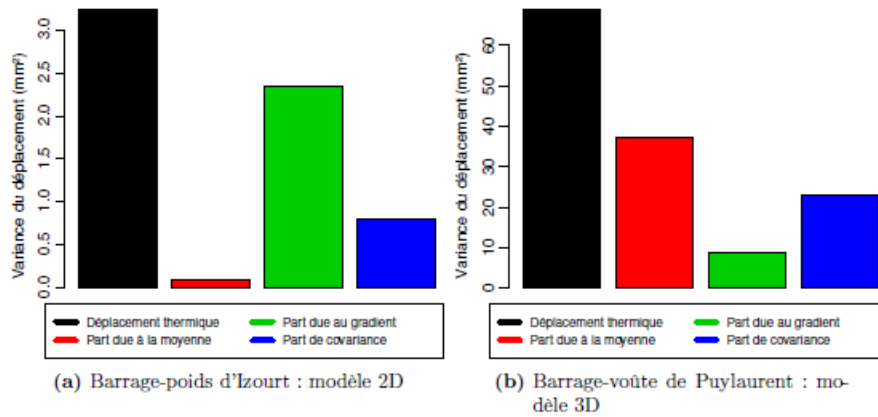
Figure 20 : Evolution de la dispersion des modèles HST et HSTT lors du traitement d'une série de déplacements heuristiques issus de calcul EF à complexité croissante (1. Prise en compte de la température de l'air, 2. Prise en compte de la température de l'air et de l'eau, 3. Prise en compte de la variation de la cote de retenue, 4. Ajout du rayonnement solaire, 5. Ajout de l'influence thermique du vent) [Tatin *et al.*, 2015]

En collaboration avec la DTG d'EDF, F. Dufour, M. Tatin et moi-même (thèse de M. Tatin / encadrement MB : 50%, dirigée par F. Dufour) avons alors proposé, développé et évalué les performances de deux nouveaux modèles physico-statistiques basés sur le théorème de réciprocité thermo-élasticité [Timoshenko et Goodier, 1970] qui permettent de prendre en compte l'influence de la température de l'eau qui s'est révélée être l'un des facteurs prépondérants d'incertitude. Dans un premier temps, c'est uniquement la valeur moyenne qui a été introduite. Puis, parallèlement à des mesures in-situ de température d'eau, des profils réalistes sont pris en compte sur la hauteur du barrage permettant la prise en compte de gradients de température. Le déplacement d'origine thermique s'écrit ainsi comme une somme de deux termes liés à la température moyenne et au gradient de température à chaque élévation et peut être calculé à partir des fonctions d'influence ( $M(h)$  et  $G(h)$ ) (cf. équation ci-dessous). Ces fonctions d'influences peuvent être déterminées lorsque la maquette numérique du barrage existe ou elles peuvent être approchées par des polynômes qui s'ajustent statistiquement sur une période de calage du modèle.

$$\delta_{th} = \int_H T_M(h) \cdot M(h) \cdot dh + \int_H T_G(h) \cdot G(h) \cdot dh$$

où  $M$  et  $G$  sont deux fonctions d'influences entre température et déplacement





L'analyse des déplacements d'origine thermique révèle qu'effectivement pour le barrage poids, la composante liée au gradient est prépondérante alors que pour le barrage voûte, la température moyenne a la plus grande influence [Tatin, 2014]

Par ailleurs, la discrétisation verticale du barrage dans le dernier modèle intitulé MT (pour multi-tranche ou Maxime Tatin) permet de prendre en compte de manière réaliste l'effet de la variation de la retenue d'eau [Tatin *et al.*, 2018].

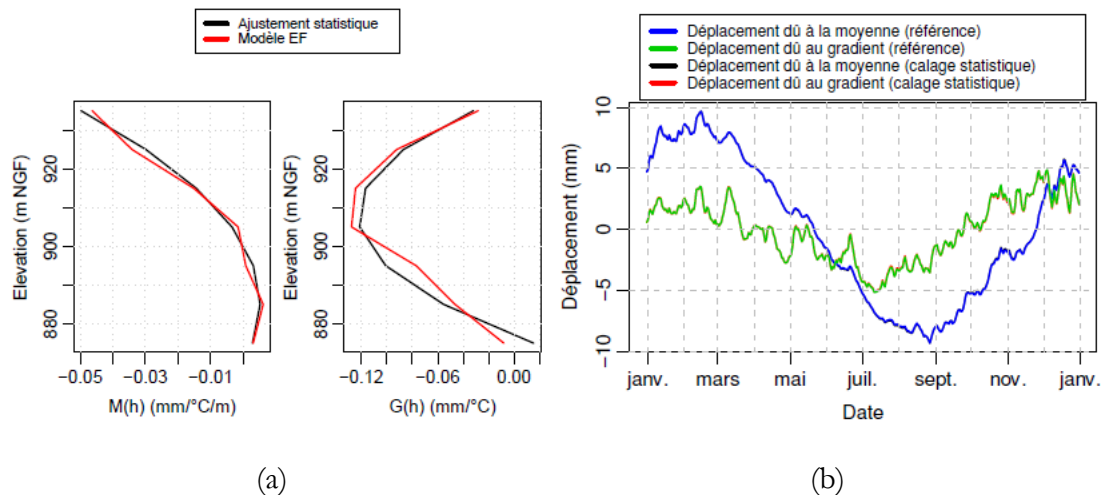


Figure 21 : Ajustement des déplacements issus de l'approche basée sur le théorème de réciprocité thermo-élastique : fonction d'influences thermiques (a) et séparation des effets des déplacements thermiques (b)

Moyennant certaines hypothèses concernant la forme et les conditions limites des fonctions d'influence pour éviter certains problèmes de compensation entre les tranches durant l'ajustement statistique, ces modèles ont été testés sur un environnement virtuel (modèle aux éléments finis) puis sur un cas d'étude réelle. Ils montrent une diminution significative de la dispersion résiduelle ainsi qu'une augmentation du caractère prédictif (capacité à séparer les différentes influences).

L'analyse des données de monitoring pour mettre en évidence un comportement singulier d'un ouvrage et/ou planifier des opérations de maintenance est primordiale pour les exploitants de ces structures. Néanmoins, pour avoir un diagnostic précis sur la pathologie et sa localisation dans l'ouvrage, il est nécessaire de disposer d'un nombre important de mesures dans l'espace mais également dans le temps. Pour les ouvrages nucléaires dont une

partie de l'instrumentation se trouve au cœur de l'ouvrage, l'augmentation du nombre de capteurs défectueux avec le temps pour diverses raisons rend le diagnostic parfois impossible ou incomplet. Il est donc impératif de pouvoir palier à la défaillance de ces capteurs. Pour des capteurs coulés dans le cœur de la paroi de béton, un simple remplacement des capteurs n'est pas possible et il convient de trouver des méthodes alternatives pour obtenir la même information qu'avant la défection du capteur. Le même concept de maquette numérique a été utilisé dans la thèse de M. Boucher (encadrement MB : 50%, dirigée par F. Dufour) pour étudier la possibilité de remplacer les capteurs de cœur par des capteurs de surface plus facilement interchangeables.

Après avoir défini les conditions limites les plus représentatives pour une représentation d'ouvrage de type PACE (cf. figure 20) sur des modélisations thermo-hydro-élastiques d'un maillage de type secteur et identifié son domaine de validité, des simulations thermo-hydro-visco-élastiques ont été réalisées sur plusieurs dizaines d'années (cf. Figure 23).

Il est à noter ici que les simulations sont basées sur des relevés réels de températures et d'humidité dans une enceinte du parc nucléaire Français et que les paramètres du modèle utilisé ont été identifiés sur une campagne d'essais en laboratoire. Il n'y a donc aucun recalage sur les résultats des simulations à l'échelle du VSR (volume structural représentatif).

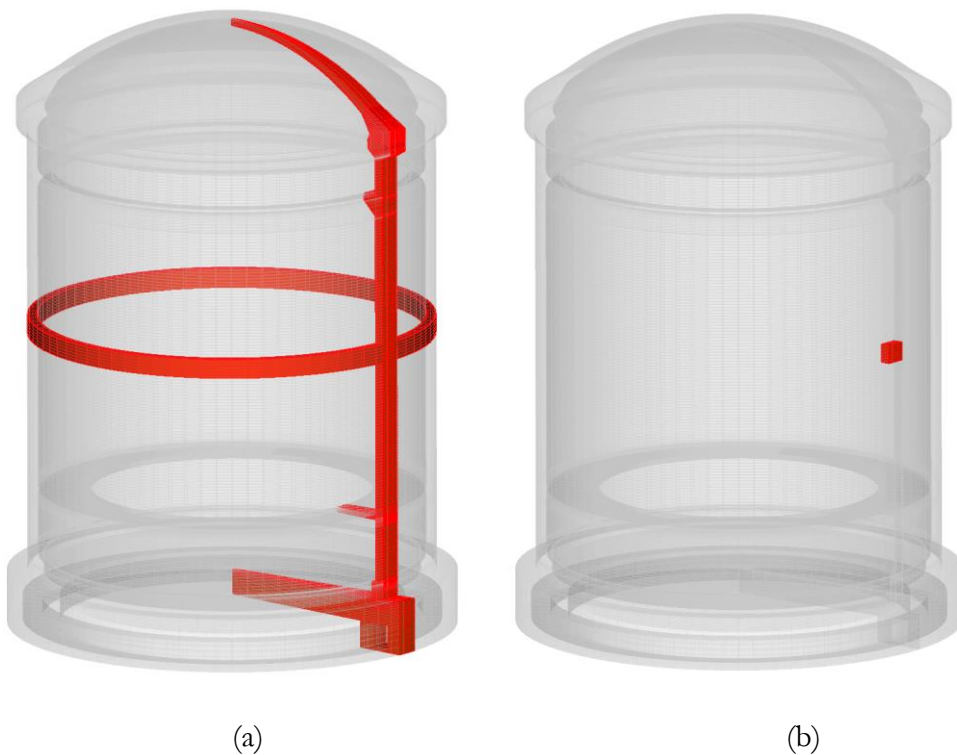


Figure 22 : Type de représentation possible pour une modélisation incomplète d'un ouvrage : représentation de type anneau ou secteur (a) et de type PACE (partie courante d'enceinte) (b)

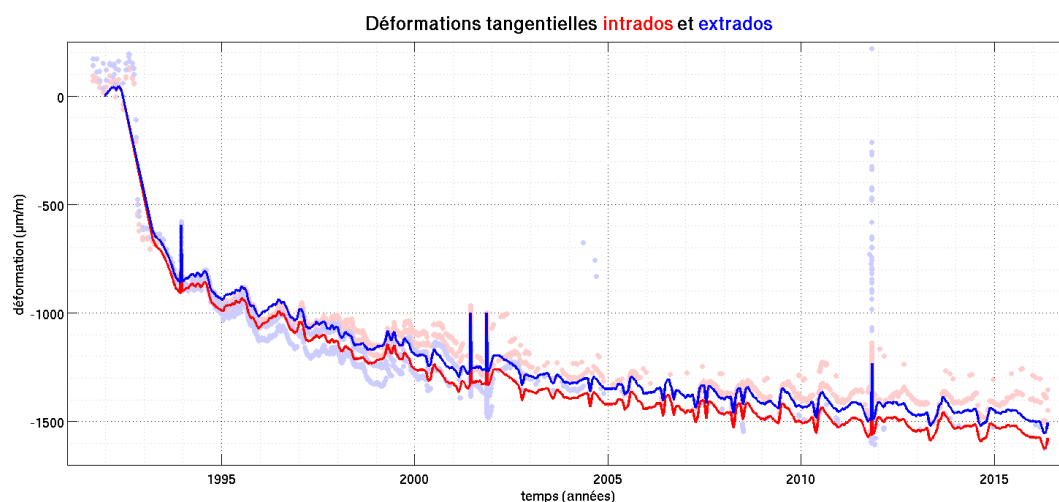


Figure 23. Evolution des déformations tangentielles en intrados (bleu) et extrados (rouge) au cours de la vie d'un ouvrage : Mesures in situ et simulations

Les données des calculs éléments finis ont ensuite été utilisées pour établir une fonction de transfert entre la mesure faite en parement et la mesure à cœur qui dépend essentiellement de la géométrie de la température. Il convient désormais de tester cette fonction de transfert sur d'autres ouvrages dont on connaît les mesures à cœur et les mesures en parement pour évaluer la performance de cette fonction de transfert.

L'utilisation des maquettes numériques pour prévoir l'évolution à long terme du comportement d'un ouvrage ne présente aucun intérêt sans l'utilisation de modèles de comportement THM. Pour que les simulations soient envisageables dans un temps raisonnable, il est nécessaire d'avoir recours à des modèles simplifiés (basés sur certaines hypothèses). Outre l'analyse des résultats, la connaissance de ces modèles, de leurs limites, de leurs procédures de calibration et des hypothèses sur lesquelles ils reposent constituent une part importante de mon apport scientifique.

Par ailleurs, les connaissances acquises dans la thèse de M. Tatin et M. Boucher sur les systèmes de monitoring d'ouvrage, le traitement des données issues de ces systèmes ainsi que l'analyse de ces données m'ont permis de proposer aux étudiants du M2 Génie Civil de l'UGA (UFR Phitem) un cours d'initiation à ces techniques d'auscultation avancées.

### Analyse critique

Dans ces études, nous avons pris le soin de prendre en compte finement les déplacements (et/ou déformations) d'origine thermiques et hydriques. Néanmoins, nous avons toujours considéré un comportement élastique (ou visco-élastique) pour le béton et l'éventuelle fissuration est négligée. Très peu de recalages ont été nécessaires montrant que sous ces conditions, il n'y a pas d'effets d'échelle à considérer et qu'ils sont principalement à relier aux phénomènes de rupture. Par ailleurs, sans données expérimentales in-situ, la validation du ou des modèles de séchage demeure impossible. Pour compléter et améliorer ces études, il serait de bon aloi de prendre en compte les singularités de comportements (fissures thermiques existantes, fissurations du contact béton/rocher pour le barrage, fissuration de dessiccation en peau,...). Pour cela une meilleure connaissance sur le comportement des interfaces et sur le séchage du béton semblent nécessaires et feront l'objet de propositions dans la seconde partie de ce manuscrit.

## II.2.2 Impact du fluage sur la résistance des bétons

A l'échelle de la structure, le fluage du béton engendre d'importantes déformations ayant pour conséquences des déplacements irréversibles de certains points de la structure ainsi que, dans le cas d'une structure précontrainte, une diminution de celle-ci. Ces déformations peuvent largement atteindre et même dépasser les déformations qui causeraient un endommagement sous une sollicitation quasi-statique. L'évolution des propriétés mécaniques du béton générées par le fluage se pose alors comme un verrou scientifique important. Pour lever celui-ci, la méthodologie adoptée diffère un peu de celles précédemment présentées dans le sens où, même si le point de départ reste des expérimentations fines à l'échelle de l'éprouvette de laboratoire, les simulations numériques ne se situent pas à l'échelle de l'ouvrage. En effet, dans toutes les simulations présentées jusqu'à présent dans ce mémoire, le béton est considéré comme un matériau homogène. Or, dans le béton, la matrice cimentaire présente des déformations de fluage sensiblement plus importantes que celles des granulats. Des incompatibilités de déformations se forment alors générant des contraintes internes et/ou de la microfissuration.

Dans le cadre de la thèse de Z. Kammouna (encadrement MB : 50%, dirigée par Y. Malecot), nous avons réalisé une campagne expérimentale en soumettant des échantillons de béton à une charge constante pour analyser leurs comportements post fluage en traction et en compression. Pour cela, un dispositif spécial a été développé permettant de charger plusieurs échantillons simultanément et d'avoir un nombre d'échantillons suffisant pour dégager des tendances.

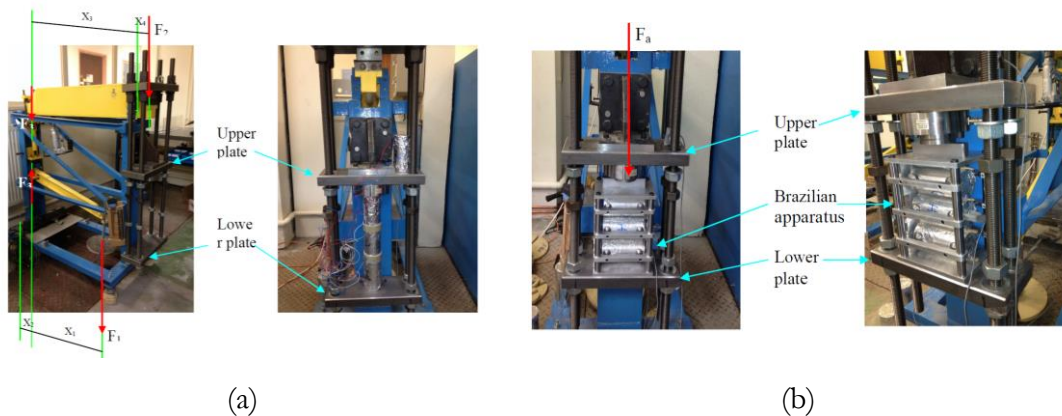


Figure 24. Banc de fluage permettant le chargement simultané de plusieurs échantillons en compression (a) et en traction indirecte (essais dit « brésiliens ») (b)

De façon surprenante mais finalement en accord avec les résultats partiels de la littérature et notamment ceux de [Brooks and Neville, 1977] [Sousa Coutinho, 1969 and 1977] [Saliba *et al.*, 2012] [Ranaivomanana *et al.*, 2013] [Asamoto *et al.*, 2014], les résultats (cf. Figure 25) montrent que pour un béton relativement jeune, une augmentation de la résistance à la compression et à la traction peut être attendue si on ne dépasse pas 50% de taux de charge. Néanmoins, pour des ratios charge/résistance plus élevés ou pour des matériaux plus matures, on observe une diminution des propriétés mécaniques dont il faudrait tenir compte. Cette diminution est à mettre en relation avec les non-linéarités entre déformation et taux de charge que l'on observe en général au-delà d'un seuil de 30 à 50% selon les

études. Il est à noter ici que ces résultats ont été obtenus pour des durées de fluage relativement courtes (3 mois) qui ne sont pas représentatives de la vie d'un ouvrage.

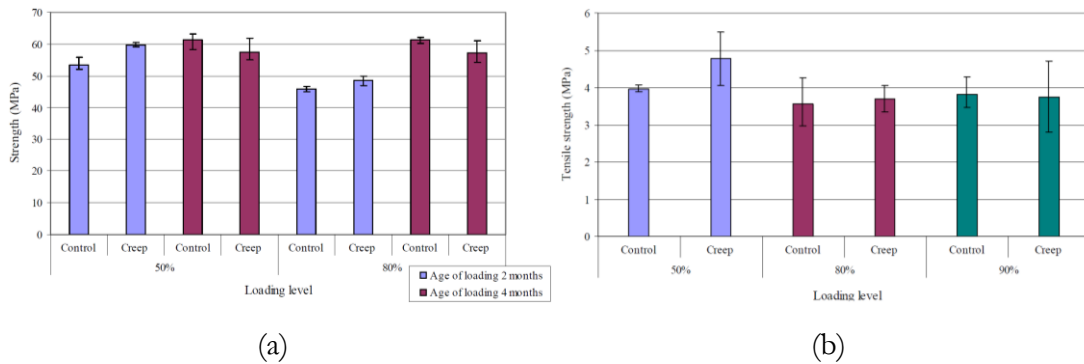


Figure 25. Evolution des performances mécaniques d'un béton après fluage en compression (a) et en traction (b)

Les simulations dites mésoscopiques qui ne représentent plus le matériau comme homogène mais qui font apparaître une phase granulaire et une phase de matrice cimentaire (cf. Figure 26), nous ont permis d'aller plus loin dans la compréhension de ces phénomènes. Pour cela, la méthode de maillage mésoscopique de Nguyen [Nguyen *et al.*, 2010] a été utilisée avec un modèle viscoélastique endommageable pour la partie cimentaire.

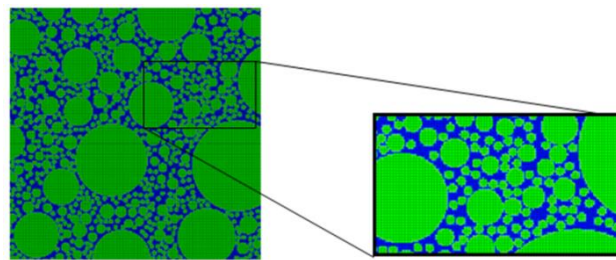


Figure 26. Exemple de maillage mésoscopique utilisé

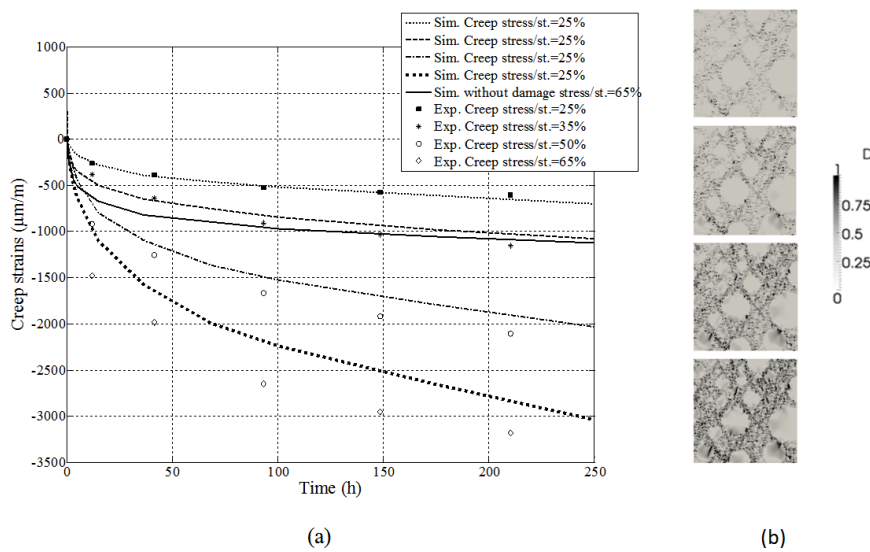


Figure 27. Evolution de déformation de fluage: Comparaison entre données expérimentales et l'approche mésoscopique avec et sans endommagement (a) champs d'endommagement associés (t=250i) pour les quatre niveaux de chargement (b)[Kammouna *et al.*, 2017]

Les simulations mésoscopiques montrent, en effet, que l'endommagement de la pâte cimentaire lié à des déformations différentielles peut expliquer une grande part de la non linéarité déformation de fluage/taux de charge. De plus, pour des bétons matures, une diminution des propriétés mécaniques allant jusqu'à 40% est observée numériquement pour des durées de chargements de l'ordre d'une année et pour les taux de charges les plus élevées. Toutefois, l'endommagement ne pouvant qu'augmenter et donc diminuer les propriétés du matériau, l'augmentation de la résistance ne peut pas ici être expliquée mais peut être attribuée à une consolidation des matériaux sous contraintes en fin de phase d'hydratation. Il conviendrait toutefois de vérifier que pour un béton plus jeune, une hydratation sous contraintes modérées mène effectivement à une augmentation des caractéristiques mécaniques. Cette augmentation pourrait avoir une origine purement mécanique (la microfissuration liée aux retraits apparaissant au jeune âge ne se développe pas à cause de l'état de contrainte) ou d'origine physico-chimique (création d'hydrates de natures différentes). Une étude sur l'isotropie de l'augmentation pourrait permettre d'identifier l'origine physique de cette « consolidation ».

Pour cette étude, mon apport se situe aussi bien sur la partie expérimentale avec la remise en fonctionnement des bancs de fluage pour des sollicitations uniaxiales que pour la partie modélisation avec d'une part l'utilisation des maillages mésoscopiques et d'autre part sur l'utilisation d'un modèle de fluage. En effet, j'avais déjà pu tester l'intérêt de ces méthodes pour la recherche de compréhension de mécanismes complexes à l'échelle macroscopique qui résultent de phénomènes simples à l'échelle de la pâte de ciment et de la nature très hétérogène du béton pour le cas du comportement au jeune âge des bétons [Briffaut *et al.*, 2013a] ou des effets de peau sur le séchage des bétons [Briffaut *et al.*, 2013b]. Par ailleurs, la remise en fonctionnement des bancs de fluage a permis leur réutilisation pour étudier des sollicitations complexes qui seront développées dans le prochain chapitre.

### **Analyse critique**

L'évolution des propriétés mécaniques après une période de fluage est un résultat novateur qui permet d'appréhender les conséquences d'une charge de longue durée sous des aspects contradictoires : une faculté d'adaptation du matériau et un endommagement lié aux incompatibilités de déformations. Une analyse plus détaillée nécessiterait d'avoir accès aux déformations de fluage. En traction indirecte, les mesures des déformations de fluage sont très faibles, sensibles aux variations environnementales même lorsque celui-ci est contrôlé et, de ce fait, difficiles à analyser. Un autre système de mesure des déformations ou une autre configuration de chargement doit être envisagée pour accroître la confiance que l'on peut avoir dans ces mesures. D'un point de vue numérique, les simulations mésoscopiques sont un outil précieux pour la compréhension des phénomènes sous-jacents au comportement macroscopique. Néanmoins, pour rendre ces simulations plus précises et notamment dans le cas de sollicitations hydromécaniques, celles-ci doivent être améliorées à minima pour les rendre tridimensionnelles et permettre l'utilisation de granulats non réguliers. En effet, si elles permettent dans le cas de la compression d'expliquer une partie du couplage entre fluage et endommagement responsable de la non-linéarité entre contraintes et déformations de fluage, les concentrations de contraintes autour des granulats sont sous-estimées. Une autre possibilité qui pourrait être envisagée est l'utilisation des champs de contraintes très hétérogènes appliquées à un matériau homogène.



### II.3 Comportement instantané et différé des interfaces béton / géomatériaux

Les précédents chapitres ont montré que le comportement dynamique et différé d'une structure est fortement lié au matériau qui le constitue et aux non linéarités comportementales qui peuvent survenir. Toutefois, les structures en béton ne sont jamais complètement isolées en terme mécanique et par conséquent leur comportement global dépend du comportement de l'interface entre la structure en béton et leur environnement. Par ailleurs, au sein même d'une structure, plusieurs matériaux coexistent (de nature ou d'âge différent) engendrant à chaque fois une interface. On peut, par exemple, penser à l'interface acier-béton dont nous avons parlé dans le chapitre 2 en termes de conductivité hydraulique ou aux reprises de bétonnage. Dans ce chapitre, je ne développerai que deux types d'interfaces entre un béton et deux géomatériaux liés aux structures stratégiques selon la méthodologie présentée sur la Figure 28. Néanmoins les développements présentés en termes d'essais et de modélisation peuvent se décliner pour d'autres matériaux qui présenteront probablement des comportements et des modes de rupture différents.

La définition même d'une interface est complexe. S'il peut s'agir du lieu géométrique bidimensionnel de contact entre les deux matériaux, une partie des deux matériaux peut également être considérée pour créer une « zone d'interface ». En effet, la présence même de la discontinuité matérielle peut générer, pour le béton par exemple, des effets de bord et le matériau proche de l'interface géométrique n'est pas identique à celui qu'on retrouverait en pleine masse. D'autre part, l'interaction entre les matériaux peut générer des échanges (hydriques, chimiques, thermiques) dégradant le matériau en vis-à-vis. La zone d'interface considérée est donc une zone tridimensionnelle qui inclue le lieu géométrique de contact ainsi que la zone dans laquelle le comportement des matériaux est différent de celui qu'on retrouve en pleine masse. Par ailleurs, il est à noter que, lors de la rupture, cette zone tridimensionnelle est le siège d'une micro-fissuration intense (dans un des matériaux en vis-à-vis ou les deux) et qui ne se limite pas au lieu de contact entre les deux matériaux s'apparentant à une « Fracture Process Zone » dans le cas d'un matériau sain.

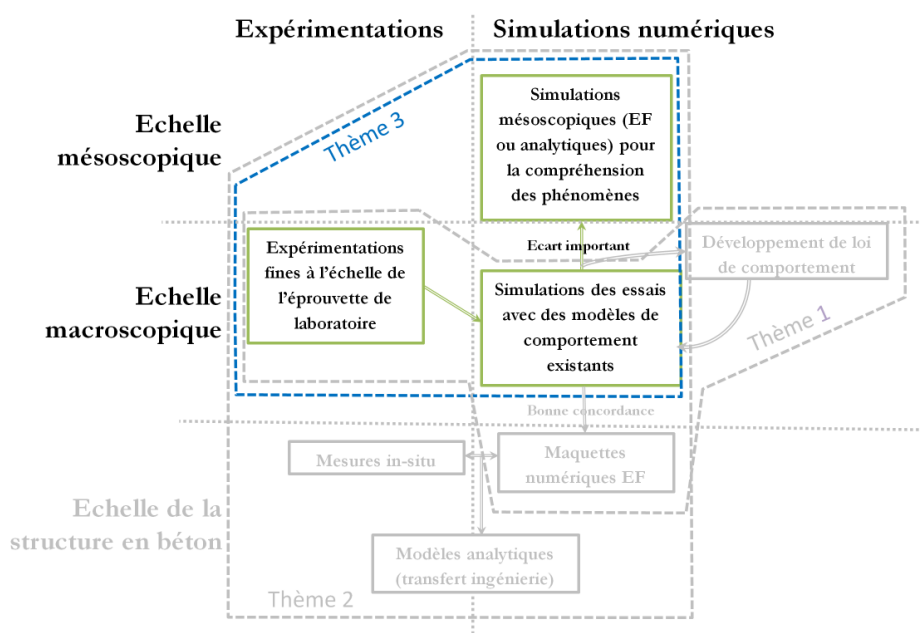


Figure 28. Méthodologie de la thématique *Comportement instantané et différé des interfaces béton/géomatériaux*

Les matériaux en contact par le biais d'une interface ont des comportements mécaniques instantanés et/ou différés (retrait et fluage) différents, et en plus d'une sollicitation de traction ou de compression, ils sont sollicités en cisaillement. En traction pure, le comportement de la zone d'interface est lié au maillon le plus faible (l'adhérence entre les matériaux ou un des deux matériaux modifiés). S'il est évident pour moi que les sollicitations de type traction et cisaillement peuvent et doivent être étudiées, dans le contexte des études constituant ce chapitre, nous n'avons étudié que des sollicitations de compression et cisaillement.

Depuis deux ans, je suis le responsable scientifique de la BCR3D (pour boîtes de cisaillement de joints rocher 3D) permettant de solliciter des interfaces décimétriques en cisaillement sous divers chemins de chargement possibles (contrainte normale constante, volume constant, rigidité normale constante), ce qui me donne l'occasion d'animer un petit groupe de recherche non uniquement lié à mes activités. Pour n'en citer que deux, cet équipement scientifique a permis l'étude du comportement du contact ballaste/traverse en béton dans le cadre de la thèse de I. Deiros ainsi que d'étudier le comportement en cisaillement d'un polymère renforcé dans le cadre de la thèse de D. Ferré Sentis conférant au dispositif un caractère transversal sur les trois équipes du laboratoire. Outre la possibilité de réaliser des sollicitations de cisaillement dans deux directions orthogonales, l'originalité et la force de ce dispositif résident dans sa capacité à conserver une charge normale centrée par rapport à l'interface et réduit ainsi fortement les possibles rotations lors de l'essai de cisaillement.



(a)

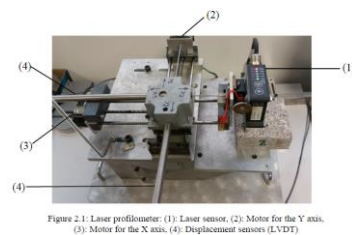


Figure 2.1. Laser profilometer: (1) Laser sensor, (2) Motor for the Y axis, (3) Motor for the X axis, (4) Displacement sensors (LVDT).

(b)

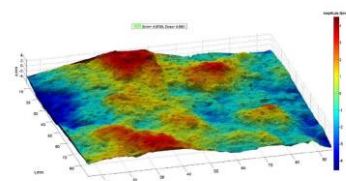


Figure 2.3: A reconstructed joint surface after the calculation of the true amplitude

(c)

Figure 29. BCR3D (a) Profilomètre laser (b) et exemple de carte 3D de la rugosité pour une interface granit béton (c)



Tableau 2. Publications et thèses associées du chapitre *Comportement instantané et différé des interfaces béton-géomatériaux*

Nombre de thèses	Nombre de publications (rang A) / publications soumises / conférences
2	2 / 0 / 3 <sup>(1)</sup> Revue : Compte rendu de l'académie des sciences (mécanique) /Acta geotechnica

<sup>(1)</sup> La valorisation du travail des thèses d'E. Stavropoulou (soutenue en octobre 2017) et B. El Merabi (soutenue en janvier 2018) récemment achevées devrait renforcer ce bilan

Sommaire du Chapitre *Comportement instantané et différé des interfaces béton-géomatériaux* :

II.3.2	COMPORTEMENT INSTANTANE D'UNE INTERFACE BETON/ROCHER	41
II.3.3	COMPORTEMENT DIFFERE D'UNE INTERFACE BETON/ARGILITE	43

### II.3.2 Comportement instantané d'une interface béton/rocher

La zone d'interface entre un barrage et sa fondation rocheuse est une zone particulièrement importante pour la stabilité de celui-ci et notamment pour les ouvrages poids car la résistance au cisaillement est la principale force s'opposant à la poussée de l'eau.

Lors de la construction d'un barrage, le corps de celui-ci est coulé directement sur une fondation rocheuse plus ou moins rugueuse. Il est conventionnellement admis que la résistance au cisaillement d'une interface au sens géométrique du terme se décompose en une force d'adhérence et une force de frottement. Si la première est liée à la surface développée, la deuxième est liée au coefficient de frottement local et à la rugosité/tortuosité de l'interface. Dans le cas d'une zone d'interface, la rupture peut également avoir lieu de façon totale ou partielle au niveau d'un des deux matériaux. La rugosité de l'interface à l'échelle centimétrique ne peut pas être explicitement représentée dans le calcul d'un barrage et doit être intégrée dans la loi de comportement de l'interface (résistance au pic, dilatance, résistance résiduelle).

La méthodologie expérimentale de cette étude consistant à complexifier progressivement le profil de rugosité de l'interface a permis d'identifier les paramètres de bases nécessaires aux simulations numériques et à produire des résultats macroscopiques sur des rugosités naturelles. En effet, la réalisation d'une campagne d'essais de cisaillement avec la BCR3D pour différents niveaux de contraintes normales sur des géométries réelles ou académiques a permis l'identification du comportement de la zone d'interface (à l'échelle de l'éprouvette de laboratoire). La résistance au pic pour les surfaces réelles obtenues a été mise en relation avec différents indicateurs de rugosités proposés par la littérature calculés à partir de données issues d'un profilomètre laser.

Les résultats montrent qu'il n'y a pas de corrélation directe entre les différents paramètres de rugosité et la résistance au pic car aucun indicateur ne permet de prendre en compte à la fois l'amplitude des aspérités et leur longueur d'onde. Un nouvel indicateur (produit de deux indicateurs précédemment testés) proposé dans le cadre de la thèse de B. El Merabi [El Merabi, 2018] (encadrement MB : 50%, dirigée par F. Dufour) permet d'obtenir une très bonne corrélation mais uniquement pour des contraintes normales faibles. En effet, une analyse plus détaillée des évolutions de la contrainte tangentielle en fonction du déplacement horizontal couplé à une analyse visuelle *post mortem* des zones d'interface permet de mettre en évidence un changement de mode de rupture avec l'augmentation de la contrainte moyenne. On passe alors d'un mode de rupture situé quasiment exclusivement au niveau de l'interface géométrique à une rupture qui passe partiellement dans le matériau le plus faible (ici le béton). La géométrie du lieu de la rupture n'a donc plus la même rugosité que l'interface et on perd la corrélation entre la rugosité initiale de l'interface et la résistance au pic.

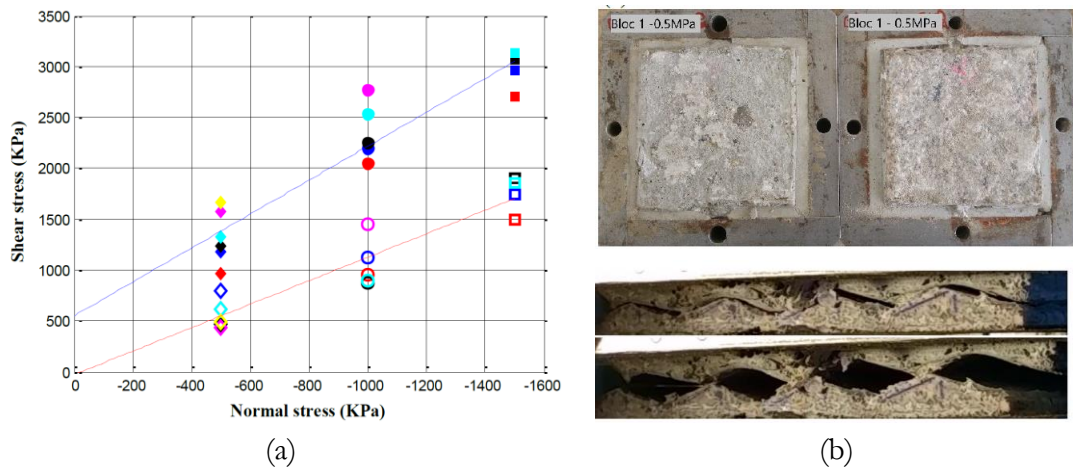


Figure 30. Evolution de la contrainte de cisaillement au pic et résiduelle en fonction de la contrainte normale pour différents échantillons (rugosités différentes) (a), photo post mortem d'un échantillon de géométrie réelle (b), Processus de rupture d'un échantillon de géométrie académique (c)

Pour prendre en compte un mode de rupture différent d'une rupture située au niveau de l'interface, un modèle analytique a été proposé. Il consiste à évaluer la position de rupture potentielle dans le matériau le plus faible à l'aide des pics locaux du profil du matériau le plus résistant (le granit). Si la résistance sur les facettes ascendantes de l'interface est plus grande que la résistance du béton en cisaillement, la force résistante du joint est calculée avec cette dernière (au prorata de la surface considérée). L'extension tridimensionnelle est réalisée grâce à la multiplication des profils 2D (obtenus par mesure laser) parallèles au sens de cisaillement. Si en terme de corrélation, ce modèle donne en première approche de bons résultats, un certain nombre d'améliorations seront détaillés dans la partie analyse critique.

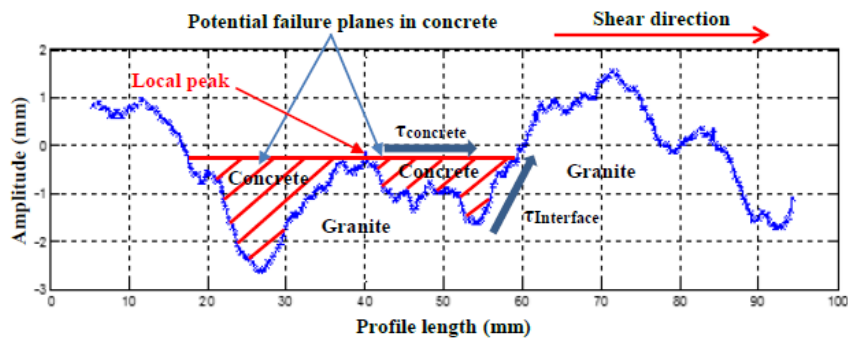


Figure 31. Schéma de rupture potentielle pour un profil de rugosité 2D

Profitant des caractéristiques identifiées sur une surface macroscopiquement lisse, le concept des simulations mésoscopiques a ensuite été réutilisé en représentant cette fois-ci non pas les granulats mais la géométrie de l'interface (cf. figure 28) avec deux types de modélisations. Le premier, de type modélisation de contact, ne considère pas l'adhérence initiale mais permet une adaptation de la surface de contact en fonction du déplacement horizontal (hypothèse des grands déplacements). Le deuxième type considère des éléments joints cohésifs et frottants ainsi que la géométrie réelle de l'interface. Il est à noter ici que seule la rugosité à une échelle intermédiaire est explicitement représentée (que l'on pourrait assimiler à la tortuosité de l'interface) et qu'une rugosité plus fine existe. Cette dernière est

prise en compte dans l'utilisation de coefficients de frottement locaux issus des essais macroscopiquement lisses (à l'échelle de la taille de l'éprouvette) mais microscopiquement rugueux.

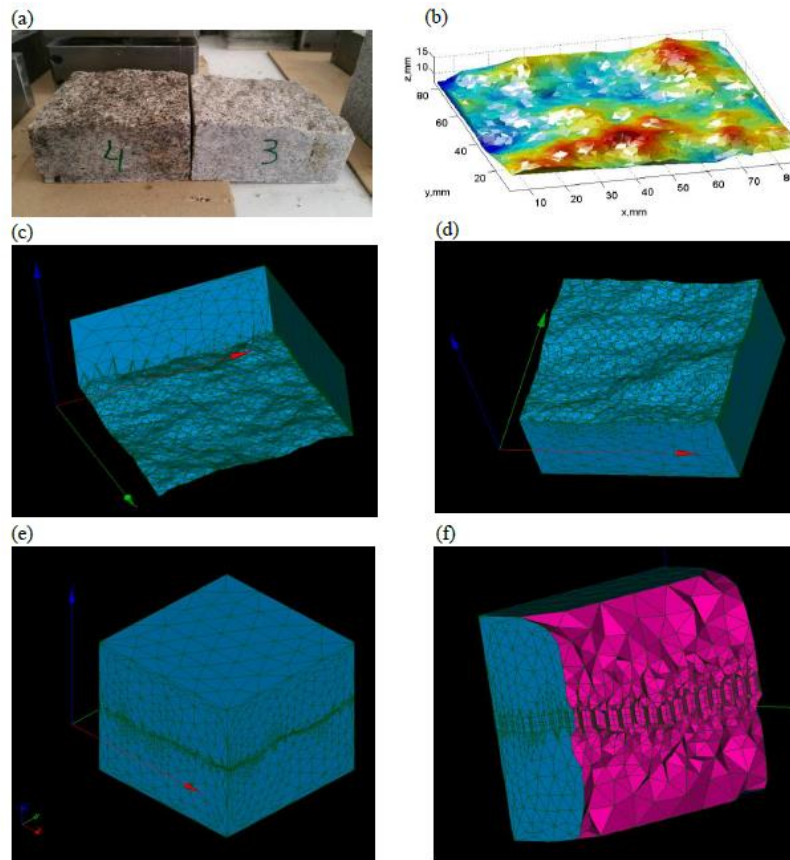


Figure 32. Création d'un maillage mésoscopique d'une interface : Surface réelle (a), relevé d'altitude de l'interface (b), maillage des parties hautes et basses de l'interface (c) et (d), maillage complet (e), coupe sur le maillage (f).

Les résultats numériques obtenus avec la modélisation de type contact sont concordants aux mesures expérimentales dans la phase de frottements résiduels. Néanmoins, même avec l'utilisation d'éléments joints, le pic de contraintes est difficile à prévoir et les résultats sont peu sensibles à la prise en compte de la géométrie de l'interface. La fragilité de ces éléments passant instantanément d'une cohésion initiale à une cohésion nulle ne permet pas la redistribution des contraintes et une rupture progressive de la zone d'interface liée à la microfissuration intense de cette zone.

### II.3.3 Comportement différé d'une interface béton/argilite

Dans ce premier cas d'étude, l'interaction entre les deux matériaux restait limitée par la nature peu poreuse et peu perméable du granite. Dans le contexte du stockage potentiel des déchets radioactifs dans une couche de roche argileuse, un contact entre béton et argilite est à prévoir avec des interactions hydriques entre les matériaux en vis à vis. De surcroît, la durée de vie de ces ouvrages de stockage nécessite une étude du comportement différée dans le temps. Le fluage étant un phénomène conceptuellement lié à un volume de matériau, il ne semble pas avoir de sens pour une interface. Pour une zone d'interface, le fluage des deux matériaux ainsi que la redistribution des contraintes liées aux ruptures

locales ou au fluage des aspérités et les variations volumiques liées au transfert d'eau génèrent à l'échelle globale une déformation tangentielle relative différée qu'il convient d'étudier.

Pour cela, après avoir identifié le comportement instantané en cisaillement de l'interface argilite-béton à l'aide de la BCR3D, nous avons conçu et réalisé un dispositif basé sur les bancs de fluage présenté dans le chapitre 2 permettant de solliciter une interface en cisaillement. Ce dispositif, baptisé SinCBox et développé dans la thèse d'E. Stavropoulou (encadrement MB : 50%, dirigée par F. Dufour) permet d'appliquer une contrainte normale et tangentielle constante et de mesurer les déplacements normaux et tangentiels (cf. Figure 33).

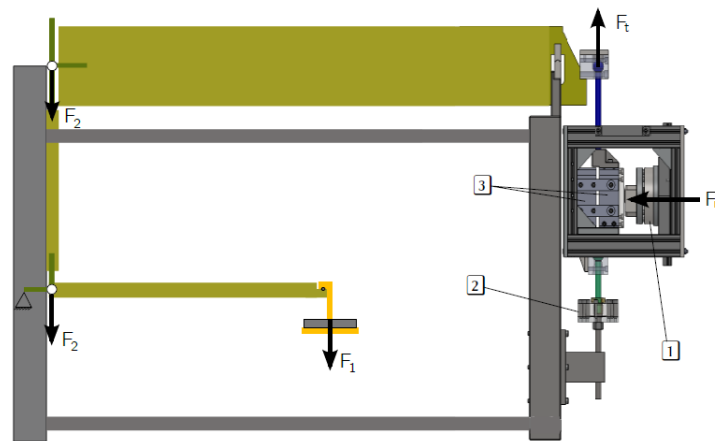


Figure 33. Concept général d'un banc de fluage équipé d'un SinCBox ([1] vérin hydraulique, [2] capteur d'effort, [3] demi boîtes de cisaillement) [Stavropoulou *et al.*, 2017]

Les résultats obtenus après corrections des déformations de fluage des scellements des deux épontes (réalisés avec un matériau cimentaire), montrent un comportement sensiblement différent en fonction du mode de réalisation de l'interface. En effet, lorsque le matériau est directement coulé sur l'argilite les déformations différées sont bien plus importantes que lorsque le béton est coulé séparément, séché et mis en contact.

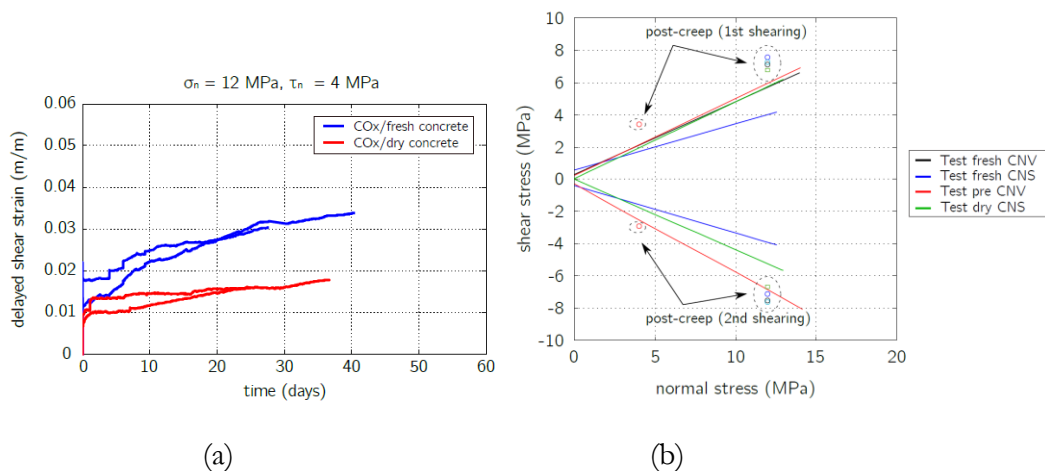


Figure 34. Evolution des déformations différées et influence du mode de réalisation d'interface béton/argilite (a) ; critère de rupture pré et post fluage (CNV : constant normal volume / CNS : constant normal stress) (b)

Par ailleurs, des essais de cisaillement quasi-instantanés post fluage ont été réalisés montrant une augmentation de la résistance en cisaillement comme observée précédemment dans le cas d'un fluage uniaxial d'un béton. Il est néanmoins probable que les phénomènes mis en jeu soient différents dans le cas de l'interface argilite/béton. En effet, plutôt qu'un phénomène d'hydratation sous contrainte, l'augmentation de résistance en cisaillement serait à mettre en relation avec la capacité d'adaptation du matériau argileux, modifiant la surface de contact au niveau des fissures générées dans l'argilite. Il n'en demeure pas moins que le rôle de l'eau et des transferts hydriques d'un matériau (le béton) vers l'autre (l'argilite) doit donc être approfondi. Pour cela, des essais d'imbibition d'une argilite ont été réalisés sous tomographie aux rayons X et sous radiographie sous flux de neutrons. La complémentarité de ces deux techniques possibles grâce aux partenariats entre l'ILL et l'université Grenoble-Alpes réside dans le fait que les rayons X sont sensibles à la densité du matériau permettant de visualiser correctement l'éventuelle fissuration alors que les images obtenues sous flux de neutrons mettent en exergue la présence d'hydrogène et donc, dans notre cas, d'eau.

Les résultats montrent que, dans les conditions d'essais (sans confinement du matériau) qui ne sont donc pas complètement représentatives des conditions in situ, une fissuration dans l'argilite se développe suite au contact avec l'eau.

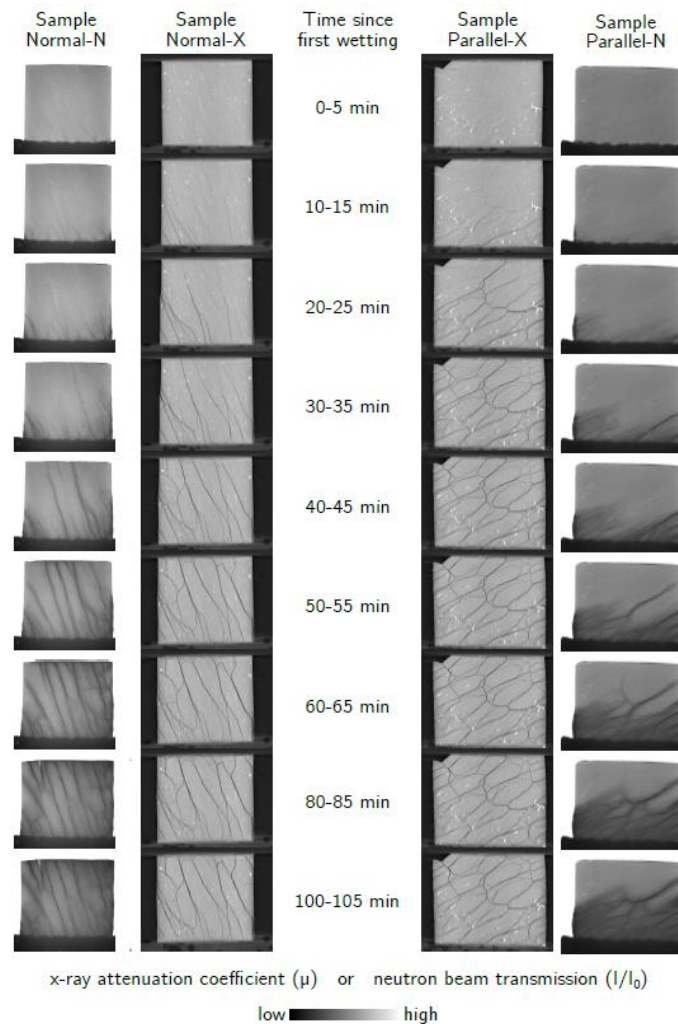


Figure 35. Evolution du processus de fissuration/imbibition dans une argilite par deux modes de visualisation : N (Neutrons), X (Rayons-X) [Stavropoulou *et al.*, 2018]

L'analyse de ces images montre un processus de fissuration/imbibition en deux phases distinctes. Dans un premier temps, après l'imbibition d'une faible quantité d'eau la fissuration démarre et se développe rapidement. Une fois le nombre de fissures stabilisé, l'imbibition de l'eau s'accélère profitant des nombreux sites de pénétration générés par la fissuration. Pour ce type d'interface, le comportement du matériau rocheux proche de l'interface est fragilisé par la mise en contact des deux matériaux et des échanges hydriques et la rupture s'opère principalement dans ce second matériau. Le sens d'imbibition vis-à-vis du plan de litage du matériau semble aussi avoir une importance sur le faciès final de fissuration.

N'étant pas spécialiste de l'imagerie par Rayons X et/ou flux de neutrons, mon principal apport réside dans la conception, le design, la réalisation et l'analyse des essais de fluage sur les interfaces. Néanmoins, l'encadrement de cette dernière expérience a permis de confirmer l'intérêt du couplage de ces techniques de visualisation pour traiter d'autres aspects liés au comportement hydromécanique des matériaux cimentaires et d'établir des collaborations avec des spécialistes de ces méthodes de visualisation (E. Ando et A. Tengattini). L'utilisation de ces méthodes de visualisation pour l'étude du comportement hydro-mécanique des matériaux poreux fera l'objet d'un axe de perspectives.

### **Analyse critique**

L'étude de deux interfaces entre béton et géo-matériaux a permis de développer des dispositifs expérimentaux, des modélisations numériques et des approches analytiques qui bien que complexes offrent des premiers résultats originaux, intéressants et utilisables pour d'autres interfaces. Il convient toutefois de poursuivre le développement de la méthode analytique pour la rendre plus robuste et tester sa capacité prédictive pour d'autres types d'interfaces. En effet, la détermination des zones de rupture possible dans le matériau le plus faible repose sur un nombre important d'hypothèses (détermination des pics locaux, horizontalité de la surface de rupture, résistance au cisaillement de béton suivant un critère de Mohr-Coulomb avec des paramètres difficiles à calibrer,...). Par ailleurs, les simulations numériques se heurtent au manque de robustesse et de représentativité des modèles développés et implantés dans les codes de calcul aux éléments finis que nous utilisons (Castem et Code\_Aster) pour représenter le comportement mécanique endommageable des interfaces. Par exemple, le passage d'un comportement local cohésif et frottant vers un comportement purement frottant se fait de manière brutale perturbant la stabilité des calculs et apportant des problèmes de convergence des calculs.

## II.4 Conclusions

Les trois chapitres de cette première partie ont permis de retracer une partie de mes différentes thématiques et activités durant six années de recherche.

Pour mener à bien ces recherches, des dispositifs expérimentaux, des simulations numériques et/ou des modèles analytiques ont été développés. Concernant les aspects expérimentaux, la remise en fonctionnement de la BCR3D, l'évolution des bancs de fluage et la création d'un dispositif de perméabilité sont des développements importants qui pourront être réutilisés dans des actions de recherches futures. Sur les aspects modélisations, le développement et/ou l'utilisation de modèle EF-THM et ED pour les sollicitations dynamiques doit être souligné. Finalement, le développement de modèles analytiques pour la prévision du déplacement en tête d'un barrage, pour la prévision de la résistance au pic d'une interface ou pour la prévision de déformations à cœur d'un ouvrage à partir de données externes peut également être mentionné. Néanmoins, ce sont plutôt les méthodologies de recherche adoptées qui doivent être mises en relief. En effet, si les outils utilisés sont importants, ils demeurent des moyens de réalisations et l'utilisation des différents outils expérimentaux et/ou numériques au sein d'une démarche plus globale permet de proposer plus facilement des avancées scientifiques sur la compréhension et la mise en évidence des phénomènes physiques qui gouvernent le comportement du matériau béton et des structures constituées de celui-ci.

La première démarche que je souhaite mettre en exergue est celle concernant l'utilisation des maquettes numériques d'ouvrages en béton. Que celles-ci soient basées sur des données à l'échelle de l'éprouvette de laboratoire ou validées par des mesures in-situ, ces maquettes numériques permettent d'identifier les facteurs prépondérants à prendre en compte dans l'étude d'un ouvrage. Cette démarche peut être adaptée à tout type de structures et à différents types d'analyses et facilite le transfert des résultats scientifiques vers l'ingénierie.

La deuxième méthodologie qui me semble importante est celle qui consiste à enrichir géométriquement les simulations d'essais de laboratoire pour comprendre l'influence des hétérogénéités au sein d'un ou plusieurs matériaux. En effet, un comportement macroscopique même obtenu expérimentalement n'est pas toujours suffisant pour décrire les phénomènes physiques et pouvoir extrapoler une loi matériau à l'échelle de la structure possiblement soumise à des chargements différents. L'utilisation de méthodes mésoscopiques représentant les géométries des granulats pour le béton ou la géométrie du contact entre deux matériaux pour l'étude des interfaces permet une meilleure compréhension des phénomènes qui gouvernent les comportements du béton ou d'une interface à l'échelle de son VER et ainsi faire des choix de modélisation qui sont physiquement justifiés augmentant ainsi la nature prédictive des modèles.

C'est donc fort de ces outils (expérimentaux, numériques et analytiques), de ma capacité à faire cohabiter ces différentes approches (l'analyse de mes publications révèle que près de la moitié comporte à minima deux aspects) à différentes échelles pour les rendre complémentaires et synergiques, et de ces méthodologies que j'envisage la suite de ma carrière de chercheur. Toutefois, l'analyse ne serait pas complète si je n'envisageais pas certaines menaces et/ou faiblesses. En effet, si la Chaire Pereniti et le projet Macena m'ont permis d'accroître ma visibilité nationale, leurs fins probables marqueront inévitablement la



fin d'une période faste en termes de nombre de doctorants. La construction d'un programme de travail ciblé, précis, original et ambitieux est donc une priorité.

### III. **Projet de recherche**

[Un bon *scientifique* est celui qui est capable de *prévoir* l'avenir et qui, par la suite, est également capable d'expliquer pourquoi les choses ne se sont pas passées comme il l'avait *prévu*]

Citation adapté de **Winston Churchill**

Les différentes analyses critiques que j'ai faites sur les thématiques présentées dans la partie 1 de ce mémoire ouvrent des perspectives à mes travaux de recherche à court terme.

Par exemple, la mesure d'un début de fuite à travers un échantillon de béton fissuré sous sollicitations cycliques permettrait de proposer des lois de couplage entre des modèles non linéaires et la perméabilité d'un échantillon plus prédictive quel que soit le chargement. Ce type de caractérisation pourrait être réalisé à partir d'essais brésiliens (ou d'un essai de type BIPEDE) contrôlés en ouverture de fissure puis rechargés par une compression radiale. Une autre possibilité serait d'utiliser l'essai initialement proposé par Nooru-Mohamad [Nooru-Mohamed, 1992][Nooru-Mohamed *et al.*, 1993] et reproduit récemment au LMT Cachan [Nierenberger *et al.*, 2012][Carpiuc-Prisacari *et al.*, 2017] qui permet d'imposer des chemins de fissuration complexes. Couplé à une mesure de débit de fuite, ce type d'essais permettrait d'évaluer la pertinence des lois de couplages de modèle hydro-mécanique sous sollicitations complexes et/ou cycliques.

Egalement, l'étude de l'influence des paramètres du modèle analytique permettant de prévoir la résistance d'une interface entre deux matériaux en fonction de sa rugosité ainsi que l'étude de sa validité pour d'autres types de matériaux en regard semble réalisable dans des délais courts. A ce jour, les surfaces de rupture locale à l'échelle des aspérités sont supposées parallèles au cisaillement. Cette hypothèse peut être levée en imposant à ces surfaces de s'étendre de sommet à sommet des aspérités, voire de laisser libre ce paramètre et de réaliser une minimisation de l'énergie dissipée pour les identifier. Ainsi la prédictibilité de la résistance du joint sous diverses contraintes normales uniquement à partir de la géométrie et des caractéristiques mécaniques des matériaux en contact serait améliorée. Dans cette démarche, il est essentiel de connaître les caractéristiques de l'interface et du matériau béton. Dans les deux cas, l'échelle de caractérisation est primordiale. En effet, pour la rupture du béton, ce n'est pas réellement le béton qui va rompre mais plutôt le mortier car les granulats ne peuvent pas entrer entre les aspérités de l'interface à l'échelle de l'éprouvette de laboratoire. Il faudra donc identifier à partir d'une série d'essais dédiés, le comportement en cisaillement du mortier, par exemple sur un essai avec une rugosité manufacturée en triangle à forte inclinaison.

Toutefois, ces perspectives restent des extensions aux travaux présentés et ne définissent pas de nouvelles orientations de recherche. L'objectif de cette deuxième partie de manuscrit se veut plus large et a pour objectif de définir un projet de recherche à plus long terme en lien avec les connaissances et compétences acquises durant ces premières années de recherche et en utilisant les méthodologies et les outils développés.

Le premier axe de recherche concerne l'utilisation d'une nouvelle méthode de visualisations croisées par rayons-X et flux de neutrons pour progresser sur la compréhension des phénomènes qui régissent le comportement hydromécanique des bétons alors que le deuxième axe, connecté au premier par le fait qu'il s'intéresse aussi au comportement hydromécanique, traitera, lui, du comportement des interfaces entre géomatériaux. Pour chaque axe de recherche, les verrous scientifiques seront présentés puis la démarche et les outils adoptés pour lever ces verrous seront détaillés.

Sommaire de la partie *Projet de recherche*

<b>III.1</b>	<b>COUPLAGE HYDRO MECANIQUE DANS LES BETONS</b>	<b>52</b>
III.1.1	APPORT DE LA TOMOGRAPHIE NEUTRON POUR LA CARACTERISATION DES TRANSFERTS DANS LES MATERIAUX CIMENTAIRES	52
III.1.2	MODELISATION MESOSCOPIQUE 3D THM COUPLEE	56
<b>III.2</b>	<b>COMPORTEMENT HM DES INTERFACES ET MODELISATION</b>	<b>57</b>
III.2.1	CARACTERISATION EXPERIMENTALE DU COMPORTEMENT HYDROMECHANIQUE DES REPRISES DE BETONNAGE (EXTRAIT DU PRE-PROJET DEPOSE EN 2017 A L'ANR EN TANT QUE PROJET JCJC CONJOINT DISPONIBLE EN ANNEXE)	57
III.2.2	MODELISATION DU COMPORTEMENT DES INTERFACES : ELEMENT JOINT HYDROMECHANIQUE	60
<b>III.3</b>	<b>EVALUATION DES RISQUES SCIENTIFIQUES ET ADMINISTRATIFS</b>	<b>61</b>

### III.1 Couplage hydro mécanique dans les bétons

Les approches développées dans la thématique 1 ont permis d'étudier l'influence de la présence d'un fluide sur le comportement du béton et la possibilité pour un fluide de traverser un matériau par des approches respectivement couplées fortement ou faiblement. Ces approches ne peuvent pas traiter de manière rigoureuse les cas où les mouvements d'eau au sein du matériau ou vers l'environnement extérieur vont provoquer des déformations et un possible endommagement de la matrice cimentaire modifiant ainsi la capacité du matériau à être traversé. En effet, même dans le cas du couplage fort présenté pour des sollicitations dynamiques, les mouvements d'eau ne sont pas pris en compte ni en phase liquide ni en phase vapeur.

Pour mener à bien ces études, plusieurs verrous scientifiques doivent être levés. D'une part, une caractérisation expérimentale locale des mouvements d'eau est nécessaire et d'autre part, un modèle hydromécanique prenant en compte les changements de phase doit être développé.

#### III.1.1 Apport de la tomographie neutron pour la caractérisation des transferts dans les matériaux cimentaires

Les deux principales méthodes de mesure de la distribution de l'humidité dans les matériaux poreux sont la RMN (Résonance Magnétique Nucléaire) et l'imagerie neutronique. Les deux techniques ont été utilisées par plusieurs chercheurs pour étudier la distribution de l'humidité dans les matériaux poreux. Le séchage isotherme a été étudié par radiographie neutronique dans des briques [Pleinert *et al.*, 98], du béton [Hanžič et Ilić, 2003][De Beer *et al.*, 2004] et du bois [Sedighi-Gilani *et al.*, 2012]. Le séchage non isotherme jusqu'à 120 ° C en briques a été étudié par RMN [Van der Heijden *et al.*, 2009].

Des températures plus élevées causant la déshydratation ont été examinées pour les plaques de plâtre par radiographie neutronique [Sedighi-Gilani *et al.*, 2013] et par RMN [Van der Heijden *et al.*, 2011]. Une des premières applications de la radiographie neutronique appliquée au béton chauffé est rapportée dans [Zeilinger et Huebner, 1976]. Bien que le béton n'ait été chauffé qu'à 170°C, température où la déshydratation n'est que partielle, l'expérience montre déjà un front de séchage. La déshydratation du béton à des températures allant jusqu'à 500 °C a été étudiée par radiographie neutronique [Weber *et al.*, 2013] [Toropovs *et al.*, 2015] et par RMN [Van der Heijden *et al.*, 2012]. Toutes les expériences ci-dessus ont essentiellement donné des profils d'humidité unidimensionnels (moyennés dans l'épaisseur de l'échantillon). Des informations plus détaillées sur la distribution locale peuvent être obtenues par tomographie neutronique.

Le principe de base de la radiographie neutronique est similaire à celui de la radiographie par rayons X. Un faisceau de neutrons traverse l'échantillon et laisse une image sur le détecteur. Les neutrons interagissent avec les noyaux des atomes de l'échantillon et sont atténués par l'absorption et la diffusion. Cependant, le mécanisme est différent de celui des rayons X, où l'interaction est avec les électrons et l'atténuation est à peu près proportionnelle au nombre atomique des éléments. Les neutrons et les rayons X étant atténués différemment par des éléments spécifiques, leurs champs d'application sont complémentaires. Par exemple, les atomes d'hydrogène atténuent fortement les neutrons, mais faiblement les rayons X. Cette caractéristique fait de la tomographie neutronique un

outil très sensible pour suivre les changements de la teneur en eau d'un matériau. D'autre part, l'aluminium est presque transparent aux neutrons, alors qu'il est plus opaque aux rayons X. Cette caractéristique est importante et intéressante pour la conception des différentes expériences.

Dans un béton, les agrégats et le ciment anhydre sont presque transparents aux neutrons, tandis que les produits d'hydratation et les pores capillaires remplis d'eau produisent une plus grande atténuation. Cependant, il n'est pas possible de faire la distinction entre l'eau libre et l'eau liée chimiquement. D'autre part, la vapeur n'est, à priori, pas visible car la densité des atomes d'hydrogène y est trop faible.

#### a. Dessiccation des matériaux cimentaires

Après le coulage, l'hygrométrie interne du béton est généralement supérieure à celle de l'environnement. La conséquence de cet état non équilibré est la migration de l'eau du milieu poreux du béton vers l'extérieur, entraînant le développement d'une pression capillaire négative sur les couches proches de la surface. La migration d'eau s'accompagne d'un retrait de la pâte de ciment (retrait dit de séchage) qui, dans le cas de structures massives, est empêché non seulement par les agrégats mais également par la partie centrale de l'élément structurel en béton qui reste plus saturée. Cette contraction conduira à la génération de contraintes de traction qui entreront en compétition avec la résistance du béton et conduiront potentiellement à la fissuration.

L'analyse du processus de séchage est généralement effectuée d'un point de vue macroscopique (les pertes d'eau sont déterminées lorsque les échantillons de béton atteignent la stabilité en terme de masse dans un environnement hygroscopique contrôlé) et la caractérisation directe du champ hydrique est complexe. La calibration des modèles de séchage est alors délicate puisque plusieurs jeux de paramètres permettent de reproduire la perte en masse macroscopique. Par ailleurs, l'influence de la fissuration ne peut être étudiée avec les profils 2D moyennés dans l'épaisseur issus de mesure RMN ou de radiographie neutronique.

L'objectif de cette étude qui sera réalisée dans le cadre de la thèse de H. Cheick Sleiman (Agrément de direction obtenu en 2017/co-directeur S. Dal Pont et co-encadrant A. Tengattini) est d'accéder à une information locale à l'échelle mésoscopique (définie comme l'échelle de l'agrégat) de la teneur en eau, son évolution et la fissuration du matériau cimentaire qui en résulte. La tomographie neutronique est alors une technique idéale pour suivre les profils de teneur en eau et la tomographie aux rayons X réalisée sur le béton sera un outil très efficace pour étudier l'initiation et la propagation de la fissuration.

Trois types de spécimens à matrices cimentaires pourraient être considérés: un béton ordinaire (OC), un mortier et un échantillon de pâte de ciment. Ils seraient alors soumis à un processus de séchage dans deux conditions d'humidité relatives différentes pour étudier l'influence de la vitesse de séchage sur le profil d'humidité et de fissuration. Les échantillons devront être conçus de manière à obtenir un gradient hydrique représentatif et qui induisent la fissuration par auto-contraintes, tout en restant suffisamment petits pour permettre une imagerie neutronique à faible bruit. Pour cela, une étude paramétrique à l'aide d'un modèle de séchage simplifié permettra d'optimiser les dimensions des échantillons à visualiser.

b. Déshydratation des matériaux cimentaires

A haute température, le phénomène de séchage est accéléré mais d'autres phénomènes peuvent également apparaître. En effet, d'une part l'eau chimiquement liée peut également être relâchée (modifications des hydrates du béton) et vaporisée. Par ailleurs, la formation d'un bouchon liquide pourrait également apparaître à l'arrière du front de déshydratation.

Ce processus entraîne l'évolution de la pression interstitielle et influence également la propagation de la température. Afin de mieux comprendre le mécanisme complexe de l'écaillage, il est primordial de pouvoir suivre la répartition de l'humidité dans le béton pendant l'exposition au feu.

La difficulté avec la tomographie est le temps d'exposition relativement long nécessaire avec les neutrons. De plus, un tomogramme est reconstruit à partir d'un grand nombre de projections et le temps nécessaire pour l'acquérir peut facilement excéder plusieurs dizaines de minutes. Si, à température ambiante, les temps de séchage sont très longs devant les temps de scan, à haute température, l'hypothèse d'un état stationnaire sur la durée d'acquisition des images n'est plus acceptable. Les projections prises au début ne seraient plus en corrélation avec les projections prises à la fin d'une rotation, ce qui détériorerait grandement la reconstruction des tomogrammes. L'utilisation de la nouvelle ligne d'imagerie (NEXT<sup>2</sup> / collaboration entre l'UGA et l'ILL), possédant une des sources les plus puissantes au monde, permet l'acquisition d'un tomogramme en une minute moyennant une dégradation de la qualité des images (taille des pixels env. 200 $\mu\text{m}$  /Figure 36).

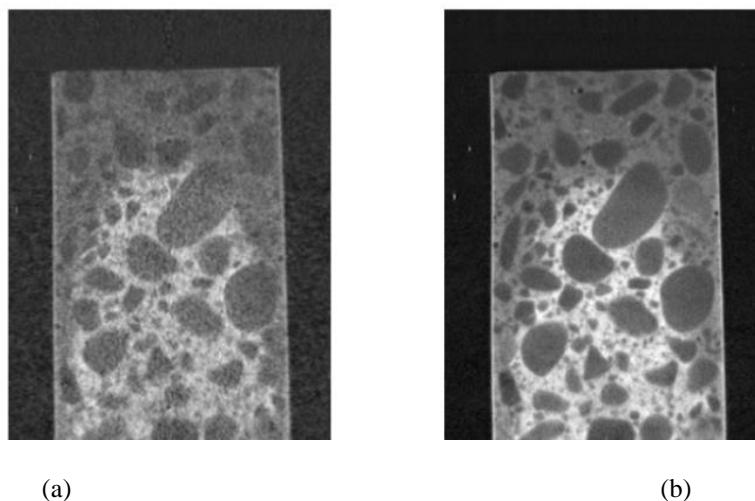


Figure 36. Illustration de la perte de qualité d'image liée à la rapidité d'acquisition : coupe d'une tomographie obtenue en 1min, taille des pixels 200 $\mu\text{m}$  (a) ou en 1h, taille des pixels 50 $\mu\text{m}$  (b)

L'acquisition de tomogrammes en une minute semble être assez rapide pour capturer l'évolution du front de déshydratation. En effet, celui-ci se déplace d'environ 600  $\mu\text{m}$  (ou trois pixels) pendant un balayage. Cela conduit à un léger bruit sur les tomogrammes, puisque la reconstruction de l'image 3D suppose un échantillon fixe mais cela n'affecte que la matrice cimentaire mortier; les agrégats ne bougent pas et montrent des limites nettes.

---

<sup>2</sup> <https://next-grenoble.fr/>

Les premiers résultats, étudiant l'influence de la taille des granulats (à volume de pâte de ciment constant) et réalisés dans le cadre de la thèse de D. Dauti (encadrement MB 25%, co-dirigée par S. Dal Pont et B. Weber), sont présentés sur la Figure 37. Ces premiers résultats montrent que le front de séchage se déplace plus vite dans l'échantillon avec une taille d'agrégats plus grande ce qui peut sembler paradoxale. Une explication physique possible pourrait provenir d'un champ thermique différent lié à la présence de plus grands agrégats. Cependant, une analyse d'images plus quantitative est nécessaire pour révéler les raisons physiques derrière cette observation. En effet, l'endommagement thermique augmente avec la taille des granulats [Grassl *et al.*, 2010][Wu *et al.*, 2015] ce qui pourrait également expliquer une perméabilité plus importante de la matrice cimentaire et donc une évolution plus rapide du front de déshydratation.

Même s'il est à noter que dans ce cas le départ d'eau est constitué d'eau non lié mais également lié, le contraste entre les parties sèches et les parties humides est important et laisse présager de nombreuses applications. Pour exemple, visualiser en temps réel si l'ajout de fibres de polypropylène constitue effectivement un vecteur privilégié de départ de gaz et d'eau limitant ainsi les surpressions permettrait une avancée scientifique importante pour le domaine du comportement des bétons à haute température.

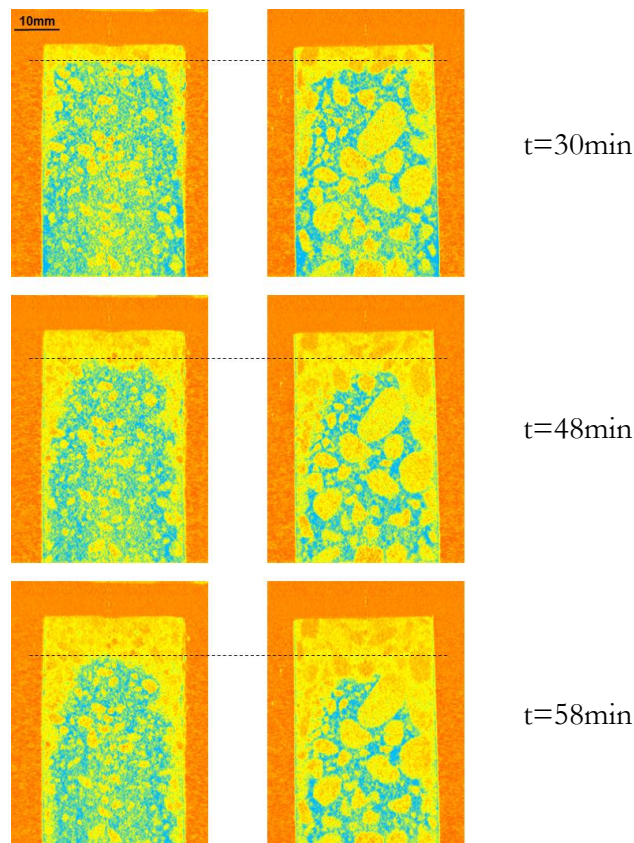


Figure 37 : Séquences de coupes verticales à partir de volumes 3D reconstituées montrant l'évolution du front de séchage à différents temps de chauffe en HPC 4mm (à gauche) et HPC 8 mm (à droite) (a), comparaison des images obtenues en « fast » tomographie



c. Influence de la fissuration du béton sur les propriétés de transfert en air-vapeur

A travers les différentes études proposées dans le projet MaCEnA, des avancées significatives ont été réalisées sur la prédiction d'un débit de fuite à travers un béton endommagé en air sec. Si plusieurs expériences réalisées à l'échelle d'un élément de structures (dalles en béton armé précontraintes [Niklasch et Herrmann, 2009], maquette d'enceinte [Granger *et al.*, 2003]) montrent que le taux de fuite en air-vapeur est inférieur au taux de fuite en air sec, les modèles existants en air-vapeur et ceux développés dans le cadre de MaCEnA en air sec sont et seront incapables d'apporter des prédictions réalistes du taux de fuite en air-vapeur.

Le développement de modèles, forcément complexes, en air-vapeur exige une validation sur des expériences simples mais réalistes dont les conditions limites mécaniques et thermo-hydriques sont parfaitement maîtrisées. En effet, en fonction du temps de séjour de la vapeur d'eau dans le béton, l'évolution de la température et de la pression du fluide percolant peut aboutir à une condensation qui s'associe à une diminution du débit de fuite. Par ailleurs, le contraste entre la température initiale du béton et celle de la vapeur entraîne des phénomènes de dilatation thermique avec de forts gradients pouvant faire évoluer les ouvertures des microfissures avec une répercussion immédiate sur la perméabilité du milieu. Dans le cadre de l'extension de la durée de vie des enceintes de confinement cette diminution est une marge de sécurité supplémentaire qu'il convient de quantifier.

Le premier objectif de cette étude sera de réaliser des essais permettant d'étudier les propriétés de transfert de la vapeur d'eau à travers un béton sain ou endommagé de manière isotrope (chargement thermique) ou localisé (fissuration mécanique). Outre la possibilité de valider les modèles visant à prévoir le débit de fuite en air-vapeur, le second objectif affiché de cette étude est de préciser quantitativement l'existence de conditions critiques (couple ouverture de fissure/pression d'injection/température) en-deçà desquelles la percolation de la vapeur d'eau est fortement diminuée, voire ne peut plus avoir lieu. L'essai mécanique utilisé (fendage ou flexion 3 points) permettra un contrôle précis de l'ouverture de fissure. Un plan d'expériences constituées d'au moins trois températures, trois ratios gaz/liquide et trois pressions d'injection permettra d'identifier les conditions les plus intéressantes qui seront reproduites pour être couplées à une visualisation de la distribution volumique de la teneur en eau dans l'échantillon de béton par tomographie aux neutrons. En effet, les champs de concentration en eau donnent accès à une information locale garante d'une discrimination objective de la pertinence des modèles bi-phasiques de transferts avec prise en compte de la condensation.

### III.1.2 Modélisation mésoscopique 3D THM couplée

Toutes les informations obtenues par tomographie neutronique et aux rayons X (champs de teneur en eau, champs de déformations) sont cruciales pour mieux comprendre la physique sous-jacente à ces processus de mouvements d'eau et nécessiteront le développement d'une quantification minutieuse par traitement d'images pour pouvoir conclure sur la prépondérance des phénomènes mis en jeu. Ces mesures quantitatives peuvent également être introduites dans un modèle mésoscopique Thermo-Chemo-Hygro-Mécanique afin de le calibrer, le valider et l'améliorer. En effet, si les simulations mésoscopiques de béton présentées dans la première partie de ce mémoire ont pour principale qualité la reproduction de la courbe granulaire d'un squelette de béton, la

représentation des granulats reste simpliste et les simulations sont bidimensionnelles. Il convient donc d'utiliser ces modélisations en 3D soit à partir des images tomographiques [Stamati *et al.*, 2018] soit à partir de génération numérique [Nguyen *et al.*, 2010]. Ainsi, le modèle THM basé sur le modèle de Gawin et Schrefler [Gawin *et al.*, 1999] [Gawin *et al.*, 2002], implanté dans castem® par S. Dal Pont [Dal Pont et Ehlacher, 2004] et récemment optimisé numériquement dans la thèse de D. Dauti [Dauti *et al.*, 2018] sera utilisable pour reproduire les essais de séchage à température ambiante ou élevée en 3D. Une meilleure compréhension de l'effet de granulats sera alors possible et une analyse critique des hypothèses faites dans le cadre des modèles simplifiés pourra être établie.

En ayant accès à la fissuration (pour des fissures ouvertes de quelques dizaines de  $\mu\text{m}$ ) des matériaux au cours d'un séchage (à haute température ou à température ambiante), le couplage entre l'état mécanique (la création de fissures) et l'état hydrique pourra aussi être étudié. Pour cela, l'utilisation des modèles couplés perméabilité/endommagement développés dans la thèse de M. El Dandachy [El Dandachy *et al.*, 2016] permettra une description complète du processus de fissuration par retrait de dessiccation empêchée.

## III.2 Comportement HM des interfaces et modélisation

Le deuxième axe constituant mon projet de recherche est principalement basé sur les avancées scientifiques réalisées dans le cadre de la thèse d'E. Stavropoulou, B. El Merabi et dans le cadre du stage post-doctoral de M. El Dandachy. En effet, si plusieurs types d'interface entre matériaux du génie civil (interne ou externe à la structure) ont été abordés (liaison roche/béton, acier/béton principalement), le comportement de discontinuités créées au sein d'un même matériau par les processus de réalisation des structures n'a été que très peu étudié dans la littérature. La première étude propose donc d'étudier le comportement des reprises de bétonnage.

**III.2.1** Caractérisation expérimentale du comportement hydromécanique des reprises de bétonnage (extrait du pré-projet déposé en 2017 à l'ANR en tant que projet JCJC Conjoint disponible en Annexe)

La pérennité des structures en béton armé est, au-delà de l'aspect humain, un enjeu économique majeur pour les pouvoirs publics. En effet, une grande partie de l'infrastructure nationale, comme les tunnels et les ponts (voies stratégiques pour les personnes et/ou les biens) qui dessinent le paysage urbain, est aujourd'hui soumise à de lourds besoins de réhabilitation. En termes de durabilité, même s'il n'y a pas de fissuration visible, l'organisme en charge de l'inspection des structures a bien conscience que les reprises de bétonnage, à savoir les discontinuités mécaniques existant à l'intérieur du béton sont les principaux points faibles structurels car ils sont susceptibles de créer des voies d'écoulement préférentielles pour les agents agressifs susceptibles de corroder le ferrailage [Setra, 2007]. Par conséquent, les reprises de bétonnage doivent être soigneusement réalisées pour éviter la dégradation prématurée de la structure et/ou pour assurer une durée de vie à long terme de la structure en béton armé réparée.

Les reprises de bétonnage peuvent être définies comme l'interface entre deux matériaux ayant des comportements mécaniques différents et ne peuvent pas être évitées dans les structures en béton. Les « reprises de bétonnage initiales » sont dues à un coulage non continu des structures en béton (particulièrement rencontrées dans des structures massives comme les tunnels et les ponts). Dans un tel cas, le béton frais est coulé sur un béton déjà

durci, les deux matériaux ayant des propriétés mécaniques et des comportements différents. Un autre type de reprises de bétonnage est observé lors d'opérations de réparation : par exemple, lorsque les structures présentent des épaufrures de l'enrobage dues à la corrosion de l'acier ou à l'exposition au feu, celui-ci doit être remplacé. Comme dans le cas précédent, le comportement mécanique du béton nouvellement coulé sera évidemment différent du béton « ancien » et éventuellement dégradé. Dans les deux cas, le comportement mécanique différentiel des deux bétons conduit à des contraintes de cisaillement dues aux retraits du béton, et des fissures de cisaillement peuvent se développer à l'interface. De plus, le processus de coulage lui-même crée une zone plus poreuse donc plus perméable où la circulation des fluides corrosifs peut être plus importante. Si la faible résistance d'une reprise de bétonnage a été montrée pour respectivement l'interface béton/béton [Briffaut, 2010] ou l'interface béton/roche [Bryne *et al.*, 2014], la présence de reprises de bétonnage est généralement négligée dans la modélisation de structures massives en béton [Corbin *et al.*, 2016] [Briffaut *et al.*, 2016].

Cette axe de recherche vise par conséquent à étudier le comportement hydromécanique des joints de construction sous contraintes de cisaillement afin de développer des modèles de comportements prédictifs basés sur la géométrie réelle (rugosité précise) de l'interface et sur le comportement mécanique des deux matériaux. En effet, une interface lisse aura évidemment une plus faible résistance et sera plus sujette à l'apparition de fissures qu'une interface plus rugueuse. D'autre part, une rugosité trop élevée peut également limiter la résistance de l'interface en augmentant la perméabilité car des aspérités plus marquées (angle important) peuvent être plus susceptibles de rompre et empêcheront une bonne imbrication des deux matériaux lors du coulage.

Dans la littérature, l'interface entre les matériaux cimentaires, notamment entre un béton à ultra-hautes performances (BFUP) et un béton ordinaire, a été étudiée pour promouvoir le BFUP comme matériau de réparation [Habel, 2004][Brühwiler et Denarié, 2008] mais les résultats sont encore incomplets. En particulier, l'évaluation de l'influence de la rugosité du béton sur les résistances mécaniques à l'échelle du joint reste qualitative [Tayeh *et al.*, 2012] et les tests de perméabilité n'ont été effectués que sur des interfaces non chargées [Momayez *et al.*, 2005]. En parallèle, si les interfaces entre le béton et les barres d'armatures ont été largement étudiées d'un point de vue mécanique [Gambarova et Rosati, 1996 & 1997][Torre-Casanova, 2012], seules quelques expériences sont disponibles pour décrire le comportement hydraulique [Briffaut *et al.*, 2015]. Grâce aux recherches liées à la sûreté des installations nucléaires [Rizkalla *et al.*, 1984] [Nagano *et al.*, 1989] [Suzuki *et al.*, 1992] [Greiner and Ramm, 1995] [Boussa *et al.*, 2001] [Riva *et al.*, 1999] [Gelain and Vendel, 2008] [Bishnoia and Vedula, 2013] et à certaines études récentes [Jourdain *et al.*, 2014] [Rastiello *et al.*, 2014] [Rastiello *et al.*, 2015], la caractérisation et la modélisation de l'évolution de la conductivité hydraulique du béton au cours du processus de fissuration ont été sensiblement améliorées. Cependant, les modèles développés pour prédire l'écoulement dans une fissure repose sur une prévision fine du processus d'ouverture de la fissure généralement observé pour une rupture en traction [Matallah et Laborderie, 2016] [Rastiello *et al.*, 2016] [Dandachy *et al.*, 2016]. Les structures en béton armé sont également soumises à d'autres modes de ruptures, en particulier en cisaillement et notamment au niveau des reprises de bétonnage, où des incompatibilités de déformations se produisent en raison du comportement mécanique différentiel et du retrait thermique, générant potentiellement un délaminage [Tang *et al.*, 2016][Zhou *et al.*, 2008].

Les modèles récents ne prenant pas en compte l'ensemble des paramètres impliqués, en particulier la rugosité de l'interface et son influence sur la résistance mécanique à la contrainte de cisaillement, ils ne prédisent pas le processus complexe conduisant à l'évolution de la perméabilité au niveau du joint.

La première partie du projet sera consacrée à la caractérisation expérimentale du comportement des joints de construction sous contrainte de cisaillement pur (mode II) grâce à la BCR3D et à la mesure de l'évolution de la perméabilité du matériau pendant le chargement. Une description précise de la rugosité des reprises de bétonnage obtenue par observations laser donnera une représentation explicite de l'interface et sera corrélée à la perméabilité mesurée. Les objectifs finaux seront de déterminer la rugosité optimale du joint qui donnera le meilleur équilibre entre résistance mécanique et perméabilité et de fournir un modèle numérique capable de décrire le comportement en cisaillement de l'interface en incluant comme paramètre d'entrée la rugosité de l'interface.

La deuxième partie, à effectuer par un post-doctorant, visera à valider la pertinence des résultats obtenus à l'échelle de l'éprouvette de laboratoire et à les utiliser pour compléter les résultats décrits dans la littérature pour un échantillon sans joint et une seule fissure. La stratégie consistera à effectuer des essais de perméabilité dans une situation plus complexe et « proche de la réalité ». A cet effet, un échantillon de béton armé sera soumis à une traction en présence d'une reprise de bétonnage perpendiculaire ou inclinée par rapport à l'axe de traction.

Même si des essais mécaniques préliminaires sur des reprises de bétonnage ont déjà été réalisés avec succès en utilisant une quantité différente de désactivant pour créer une rugosité différente (stage M2R de Dalia Al Mohamad en 2017, résultats en cours de publication), l'obtention de résultats expérimentaux en termes de perméabilité ne peut être a priori garantie. Par conséquent, certaines données expérimentales sur le comportement hydro-mécanique des joints de construction peuvent également être obtenues avec un « slant test » (plus facile à réaliser). La partie numérique pourrait s'appuyer sur des données expérimentales sur l'interface acier-béton obtenues en laboratoire [Briffaut *et al.*, 2015] et sur la maquette de Karlsruhe [Herrmann *et al.*, 09] pour des simulations d'éprouvettes en béton armé à l'échelle de l'élément de structure.

L'environnement scientifique potentiel du projet est présenté dans la figure 1a et l'enchaînement des tâches dans la Figure 38.

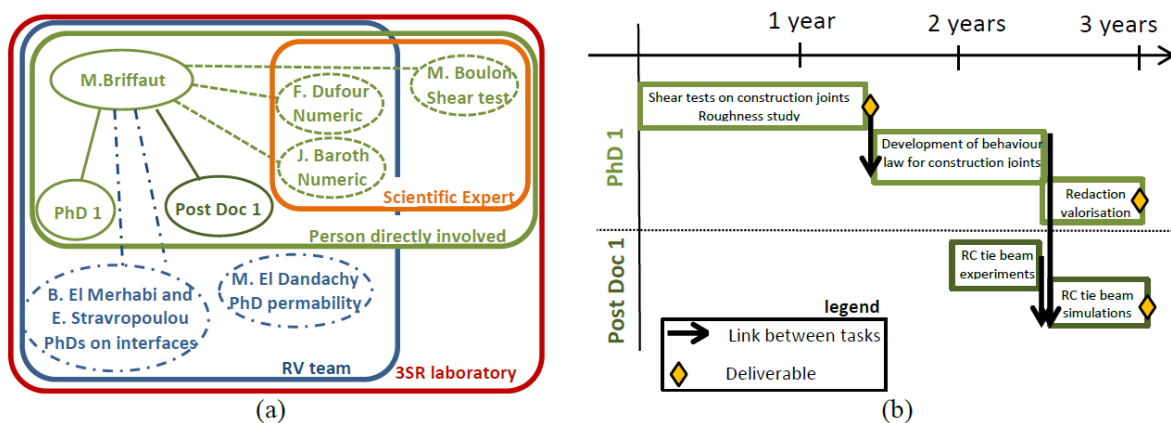


Figure 38 : Environnement scientifique de l'étude (a) Planning du projet (b)

Ma capacité à effectuer des études numériques et expérimentales (et à créer le lien entre elles) est évidemment une nécessité pour mener à bien ce projet mais je peux également compter sur l'expertise scientifique de M. Boulon pour les essais de cisaillement. F. Dufour et J. Baroth seraient impliqués dans des études numériques pour respectivement le développement de modèles de joints et la modélisation d'éléments structuraux en béton armé.

Ce projet et son éventuelle extension sont une excellente opportunité de créer une synergie entre les 3 équipes du laboratoire 3SR afin de devenir un projet transversal majeur pour le laboratoire. En effet, ce projet est la première étape d'un axe de recherche plus large qui pourrait conduire à plus long terme à l'extension des résultats à d'autres interfaces matérielles. Dans la construction de bâtiments ou d'infrastructures par exemple, des interfaces entre acier-béton / béton-sols / béton-roches / béton-bois sont fréquemment rencontrées et doivent être décrites avec précision. Une autre extension possible de ce travail consisterait à mieux prendre en compte pour les études concernant la réhabilitation et les réparations, l'âge du matériau et notamment sa dégradation chimique (RSI, RAG,...).

Au-delà du fait qu'une fissure, située ou non au niveau d'une interface, entre deux matériaux ou au niveau d'une reprise de bétonnage facilite la traversée d'un fluide au sein d'un élément, la présence elle-même du fluide (sous pression ou non) modifie le comportement en cisaillement d'une interface. L'étude présentée dans ce projet de recherche pourrait également être étendue à l'influence de la présence d'un fluide (potentiellement sous pression) sur le comportement des interfaces et sur la propagation d'une fissure. En effet, si pour un joint (ou une fissure) complètement ouvert, l'utilisation de la notion de contraintes effectives telles que définies par Terzaghi semble pouvoir s'appliquer, lorsque le joint (ou la fissure) n'est pas complètement ouvert, la prise en compte de la surface réelle du joint en contact avec le fluide est nécessaire (utilisation d'un coefficient de Biot pour définir la contrainte effective). Toutefois, les zones en contact évoluant en fonction du déplacement tangentiel relatif, le coefficient de Biot ne peut pas rester constant.

Cette analyse de l'influence de la présence de fluide doit être traitée à différentes échelles (aux mêmes échelles que celle de la rugosité du joint). En effet, même pour un joint macroscopiquement lisse, le remplissage de la rugosité microscopique par un fluide faiblement compressible provoquera une diminution du frottement identifié macroscopiquement. Cet effet, conceptuellement assimilable à une lubrification résulte de la mise en pression de l'eau au sein de la rugosité microscopique et à une diminution des forces de contact entre les deux matériaux solides.

Les récents investissements réalisés sur la BCR3D permettent désormais de solliciter des interfaces dynamiquement (vitesse de cisaillement max  $50\text{s}^{-1}$  pour une épaisseur de joint de 1cm). Il serait alors intéressant d'étudier, dans le cas de sollicitations sismiques, la prépondérance d'effet entre la lubrification du contact et par opposition l'effet Stefan (existence de forces de rappel lors de mouvements de fluides visqueux [Rossi, 1991]).

### III.2.2 Modélisation du comportement des interfaces : élément joint hydromécanique

Les premières simulations de l'essai push-in présenté dans la partie 1 ainsi que les résultats de la partie sur le comportement mécanique des interfaces montrent qu'il faut dissocier les

---

processus de création d'une fissure le long d'une interface et celui du glissement de deux surfaces rugueuses.

Des simulations mésoscopiques (représentant la géométrie des granulats ou des crénelures des armatures par exemple) associant un modèle d'endommagement pour décrire le processus de fissuration pré-pic ainsi que des éléments joints dilatant devraient permettre une meilleure reproduction des évolutions expérimentales. Toutefois, ces éléments joints doivent également être améliorés pour prendre en compte une perméabilité qui doit dépendre d'une ouverture de fissure fictive (équivalente d'un point de vue hydraulique), elle-même liée à la rugosité du joint créé ou à la dilatance macroscopique du joint.

Cette amélioration nécessite toutefois de connaître à priori la position de la fissure en mode II pour positionner les éléments joints dès la création du maillage. Dans le cas où la position de la fissure n'est pas connue à priori, l'utilisation de techniques de remaillage remplaçant un élément fini par deux éléments entre lesquels un élément joint est inséré ou d'éléments finis enrichis (E-FEM) devra être envisagée [Roubin *et al.*, 2015]. Ces développements numériques lourds ne font pas parties de mes compétences actuelles et nécessiteront des collaborations internes ou externes au laboratoire.

### III.3 Evaluation des risques scientifiques et administratifs

A l'instar de la partie « *bilan de six années de recherche* », l'analyse ne serait pas complète si je n'envisageais pas certaines menaces et/ou faiblesses. En effet, les deux axes de recherche que je propose reposent sur des dispositifs expérimentaux uniques et exceptionnels mais qui d'une part sont liés au laboratoire 3SR et qui d'autre part nécessitent la présence de personnels techniques compétents (notamment pour l'aspect imagerie par Tomographie Neutrons). En tant que responsable scientifique de la BCR3D, la gestion de cette installation m'incombe directement. Les risques administratifs sont donc plutôt liés à ma capacité à avoir des contrats de recherche sur ce dispositif afin d'en pérenniser son utilisation. D'un point de vue scientifique, les risques se situent plutôt au niveau du changement d'échelle nécessaire pour passer de l'échelle de laboratoire à l'échelle de la structure. D'une part en simulation numérique, la description géométrique de l'interface ne peut pas être aussi fine aux deux échelles et d'autre part, d'un point de vue physique des effets d'échelle liés à l'accumulation de déformations élastiques peuvent apparaître. Ce point nécessitera donc probablement de développer des essais de cisaillement sur des échantillons de tailles métriques (envisageables à long terme grâce au mur de réaction disponible au 3SR sur la dalle d'essais DESSIS).

A contrario, la ligne D50 et l'instrument NEXT (visualisation croisée RX et Neutron) issue d'une collaboration entre l'UGA et l'ILL fonctionnent comme un grand instrument sous la forme d'appel à projets et les temps de faisceaux ne sont pas garantis. D'un point de vue administratif, il conviendra donc de particulièrement travailler les réponses à ces appels à projets afin d'obtenir des temps d'accès suffisants pour mener à bien les études que je propose. Scientifiquement, la question du changement d'échelle reste posée puisque la taille des échantillons testés demeure limitée par rapport à la nature hétérogène des bétons et l'échelle d'observation des phénomènes. Le compromis entre résolution souhaitée et taille d'échantillons ne permet pas d'analyser des échantillons de bétons représentatifs de structures massives (avec des granulats centimétriques voir décimétriques pour les barrages).

D'un point de vue plus général, s'il est évident pour moi que j'ai bénéficié durant cette première partie de carrière universitaire d'un environnement scientifique exceptionnel par la richesse des outils expérimentaux et des collaborations internes et industrielles que j'ai tissées, je dois désormais prendre garde à ne pas m'isoler dans mon équipe de recherche sur les thématiques proposées dans ce projet afin de pouvoir toujours profiter de ces collaborations internes au laboratoire. Par ailleurs, je dois veiller à accroître ma visibilité internationale sur les thématiques en cours et celles projetées car celle-ci n'est actuellement effective que sur la thématique de ma thèse.

## IV. Conclusion générale

L'objectif de ce mémoire d'habilitation à diriger des recherches était double. D'une part à travers un état des lieux de mes travaux de recherche sur le comportement thermo-hydro-mécanique des matériaux cimentaires avec comme application majeure les grands ouvrages en béton, j'ai montré l'enchaînement de ces travaux, j'ai présenté les compétences acquises dans certaines actions et réutilisées dans d'autres et j'ai exposé les méthodologies et les outils utilisés qui pourront être réutilisés dans d'autres études et d'autres contextes. D'autre part, j'ai proposé un projet de recherche afin de donner une orientation à mes travaux de recherches futurs. Ce projet, basé sur les compétences, les connaissances ainsi que les outils expérimentaux et numériques développés durant ces premières années de recherche à Grenoble est résolument tourné vers une recherche scientifique amont ne mentionnant pas explicitement de collaboration avec des industriels (par exemple, la thèse de H. Cheick Sleiman est réalisée en collaboration avec Lafarge/Holcim). Toutefois, le fort lien entretenu avec les entreprises du secteur nucléaire et du génie civil en France me permet d'anticiper les recherches à mener pour pouvoir répondre aux problématiques industrielles des années à venir et c'est avec cet objectif que mon projet de recherche a été construit.

Mon arrivée au sein du laboratoire 3SR a nécessité un travail important de réorientation de mes actions de recherche exclusivement liées jusqu'alors au comportement au jeune âge des structures massives en béton afin de m'adapter aux thématiques de recherche de l'équipe. Toutefois, l'environnement de l'équipe RV ainsi que mon apport de compétences complémentaires à celles présentes, m'a permis d'être rapidement intégré dans des actions de recherche et des encadrements de thèses. Outre l'encadrement au quotidien des étudiants en thèse ayant pour objectif l'enseignement d'une rigueur scientifique indispensable à la réalisation de travaux numériques et/ou expérimentaux, ma principale contribution sur les études présentées dans la partie bilan réside dans la transmission des connaissances acquises liées à la compréhension du comportement THM vieillissant du béton et du recul nécessaire pour le design et la conception d'essais. En contrepartie, les interactions avec les différents doctorants que j'ai encadrés m'ont permis de développer de nouvelles connaissances et compétences. Durant cette période, de nombreux essais/dispositifs complexes ont été développés. Mes quelques compétences en termes de simulation ont alors permis de concevoir et de réaliser des essais pouvant servir à l'amélioration des modèles de comportement. Progressivement et en parallèle de ces actions j'ai également pu développer mes propres thématiques de recherche liées au vieillissement et à la durabilité des structures. Celles-ci n'étaient présentes à mon arrivée que sous le prisme de la fissuration des bétons. Par ailleurs, sans pour autant en devenir un spécialiste, j'ai eu l'occasion de découvrir de nombreuses techniques de modélisation. Les éléments discrets en formulation explicite, les techniques d'érosion de maillage, les méthodes de régularisation non-locales des calculs d'endommagement, les lois de contacts, les éléments joints sont autant d'outils disponibles pour relever de futurs challenges scientifiques.

Si mes actions de recherche sont toujours intimement liées au comportement du béton et des structures constituées de matériaux cimentaires, les types de sollicitations diffèrent grandement. Les outils numériques et expérimentaux adaptés à l'étude de ces sollicitations forment donc un large spectre qui rentre toutefois dans une démarche globale identique.



Celle-ci prend naissance à l'échelle du laboratoire par la réalisation d'expérimentations fines permettant d'étudier le phénomène souhaité. La reproduction numérique de ces expériences et le cas échéant la modification des lois constitutives ou la recherche d'une meilleure compréhension des phénomènes par des approches mésoscopiques permet d'être confiant dans la capacité des simulations à transcrire ce qui est observé expérimentalement. L'étude à l'échelle de l'ouvrage par le biais de maquette EF de structures utilisant ces modèles de comportement permet alors d'analyser l'influence ou de juger de la prépondérance de certains phénomènes.

Cette démarche globale qui fait appel simultanément à des outils numériques et expérimentaux s'est parfois heurtée à des verrous scientifiques importants ne permettant pas de progresser vers l'échelle de l'ouvrage. En effet, s'il est nécessaire de comprendre précisément le comportement d'un matériau pour pouvoir le modéliser et prévoir celui d'une structure, seule la réponse de cette dernière présente un réel intérêt sociétal et économique. Pour lever ces verrous, deux axes de recherches ont été proposés. Le premier repose sur l'utilisation d'une technique d'imagerie innovante permettant de progresser sur la compréhension et la modélisation des phénomènes qui régissent le comportement hydromécanique du béton. Le deuxième propose d'étudier finement le comportement des interfaces, omniprésentes au sein d'une structure de génie civil aussi bien au niveau de son contact avec l'environnement extérieur qu'en son sein. En parallèle de ces deux axes, les actions de recherches décrites dans la partie *bilan de 6 années de recherches* concernant la prédiction de la résistance d'une interface béton/géomatériaux et l'amélioration de la loi de couplage perméabilité/modèle non linéaire doivent être poursuivies afin d'en permettre une validation plus exhaustive et un transfert vers l'ingénierie.

La diversité inhérente des activités du métier d'enseignant-chercheur partagé entre activités de recherche (montage de projet, réalisation des projets, restitution des résultats scientifiques), activités administratives indispensables au bon fonctionnement des équipes de recherche et des équipes pédagogiques et activités d'enseignement, permet difficilement de maîtriser toutes les connaissances techniques et scientifiques nécessaires à la réalisation d'un projet de recherche dans sa globalité. Ainsi, un travail collaboratif avec d'autres chercheurs (intra ou extra laboratoire) et des partenaires industriels nécessitant des qualités humaines et scientifiques ainsi que des méthodologies de travail précises sont des gages de réussite et d'épanouissement professionnel.

## Références

### A

[Asamoto *et al.*, 2014] Asamoto, S., Kato, K. and Maki, T. (2014), Effect of creep induction at an early age on subsequent prestress loss and structural response of prestressed concrete beam, *Construction and Building Materials*, Vol. 70, pp. 158-164

### B

[Bailly *et al.*, 1996] Bailly P., Tombini C., et Le Vu O., 1996. Modélisation de géomatériaux sous sollicitations dynamiques élevées. I : Un tir de pénétration sur cible en béton. In colloque du réseau GEO, Aussois, France. 1996.

[Bary *et al.* 2000] Bary B, Bournazel J.-P., and Bourdarot E. Poro-Damage Approach Applied to Hydro- Fracture Analysis of Concrete. *Journal of Engineering Mechanics* 2000, 126(9) :937–943, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399.

[Bažant *et al.*, 1986] Bažant Z. P., Bishop F. C. et Chang T. P. 1986. Confined compression tests of cement paste and concrete up to 300 Ksi. *ACI Journal*. 1986, Vol. 83, pp. 553-560.

[Bishnoia and Vedula, 2013] Bishnoia L.R., Vedula R.P. (2013), Prediction of air leakage and aerosol transport through concrete cracks with a fractal based crack morphology model, *Nuclear Engineering and Design* Vol. 265, pp. 393– 401.

[Boussa *et al.*, 2001] Boussa, H., Tognazzi-Lawrence, C., La Borderie, C. (2001), A model for computation of leakage through damaged concrete structures. *Cement Concrete Comp.* Vol. 23, pp. 279–287.

[Briffaut *et al.* 2015] Briffaut M., El Dandachy M., Dal Pont S., Dufour F. (2015) Permeability analysis of the interface between concrete and rebars during push in test, *Strategies for sustainable concrete structures proceeding*, Rio, Brazil.

[Briffaut *et al.*, 2013] Briffaut M., Benboudjema, F., Laborderie, C., Torrenti J.M. (2013), Creep Consideration Effect on Meso-Scale Modeling of Concrete Hydration Process and Consequences on the Mechanical Behavior, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 139 (12), pp. 1808-1817.

[Briffaut *et al.*, 2016] Briffaut M., Benboudjema F., D’Aloia L. (2016), Effect of fibres on early age cracking of concrete tunnel lining. Part II : Numerical simulations, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 59, 221-229.

[Briffaut et Benboudjema, 2013] Briffaut M., Benboudjema F. (2013), Numerical Analysis of Cracking Induced by Drying Shrinkage in Concrete using a Mesoscopic Approach: Influence of Aggregates Restraint and Skin Effect Conference: Ninth International Conference on Creep, Shrinkage, and Durability Mechanics (CONCREEP-9)

[Briffaut, 2010] Briffaut M. (2010), Etude de la fissuration au jeune âge des structures massives en béton : influence de la vitesse de refroidissement, des reprises de bétonnage et des armatures, PhD thesis, ENS Cachan, in French.

[Brooks et Neville, 1977] Brooks, J. J., Neville, A.M. (1977) A comparison of creep, elasticity and strength of concrete in tension and in compression, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 29, pp. 131-141.

[Brühwiler and Denarié, 2008] Brühwiler E, Denarié E. (2008) Rehabilitation of concrete structures using Ultra-high performance fibre reinforced concrete. *The second international symposium on ultra high performance concrete*, Kassel, Germany.

[Bryne *et al.*, 2014] Bryne, L.E., Ansell, A., Holmgren, J. (2014), Laboratory testing of early age bond strength of shotcrete on hard rock, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 41, pp. 113-119.

[Burlion *et al.*, 2001] Burlion N., Pijaudier-Cabot G. et Dahan N. 2001. Experimental analysis of compaction of concrete and mortar. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 25, pp. 1467-1486.

[Burlion, 1997] Burlion N. 1997. Compaction des bétons : éléments de modélisation et caractérisation expérimentale. Thèse de doctorat, ENS Cachan, LMT.

**C**

- [Carpiuc-Prisacari *et al.*, 2017] Carpiuc-Prisacari M., Poncelet M., Kazymyrenko K., Hilda F., Leclerc H., Comparison between experimental and numerical results of mixed-mode crack propagation in concrete: Influence of boundary conditions choice, *Cement and Concrete Research*, Vol. 100 pp. 329–340
- [Catalano, 2012] Catalano E. (2012) A pore-scale coupled hydromechanical model for biphasic granular media : Application to granular sediment hydrodynamics. PhD thesis, Université De Grenoble.
- Cast3M®, Finite element Code, CEA.
- [Choinska *et al.*, 2007] Choinska M., Dufour F., Pijaudier-Cabot G. Matching permeability law from diffuse damage to discontinuous crack opening. Proc. Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures 2007 1:541-547.

**D**

- [Dal Pont et Ehrlicher, 2004] Dal Pont S, Ehrlicher A. (2004), Numerical and experimental analysis of chemical dehydration, heat and mass transfers in a concrete hollow cylinder submitted to high temperatures, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 47 (1), pp. 135
- [Dal Pont et al., 2011] Dal Pont, S., F. Meftah, and B. Schrefler (2011), Modeling concrete under severe conditions as a multiphase material. *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 241(3), pp. 562-572.
- [Dauti et al., 2018] Dauti D., Dal Pont S., Weber B., Briffaut M., Toropovs N., Wyrzykowski M., Sciume G., Modeling concrete exposed to high temperature: Impact of dehydration and retention curves on moisture migration, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* (under review).
- [De Beer *et al.*, 2004] De Beer, F.C., Strydom, W.J., and Griesel, E.J. (2004), The drying process of concrete: a neutron radiography study, *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 61, pp. 617-623.
- [Desmettre *et al.*, 2012] Desmettre C, Charron J.P. (2012) Water permeability of reinforced concrete with and without fiber subjected to static and constant tensile loading, *Cement and Concrete Research*, Vol. 42 (7), pp. 945-952
- [Donzé *et al.*, 2009] Donzé F-V., Richefeu V. et Magnier S.A. (2009), Advances in discrete element method applied to soil, rock and concrete mechanics. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 8, pp.1-44.
- [Dufour *et al.*, 2008] Dufour F., Pijaudier-Cabot G., Choinska M. et Huerta A. (2008) Extraction of a crack opening from a continuous approach using regularized damage models, *Computers & Concrete*, Vol. 5 (4), pp. 375-388

**E**

- [El merabi 2018] El Merabi B (2018), Comportement mécanique des joints cohésifs rugueux de béton-granite au niveau de l'interface barrage-fondation : Influence géométrique et mécanique des asperities, PhD Thesis, Université de Grenoble-Alpes.
- [Ezzedine El Dandachy *et al.*, 2016] Ezzedine El Dandachy M, Briffaut M, Dufour F, Dal Pont S. (2016) An original semi discrete approach to assess gas conductivity of concrete structures, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*.
- [Ezzedine El Dandachy *et al.*, 2016] Ezzedine El Dandachy M., Briffaut M., Dufour F., Dal Pont S. An original semi-discrete approach to assess gas conductivity of concrete structures, *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.* (2016).
- [Ezzedine El Dandachy *et al.*, 2017] Ezzedine El Dandachy M., Briffaut M., Dal Pont S. et Dufour F. (2017), Effect of creep in traction on concrete permeability, 23ème Congrès Français de Mécanique Lille, 28 Août au 1er Septembre.

## F

- [Ferry et Willm, 1958] Ferry S, Willm G. (1958) Méthodes d'analyse et de surveillance des déplacements observés par le moyen de pendules dans les barrages. VIth International congress on large dams. New-York, pp. 1179–201 [in French].
- [Frangin, 2008] Frangin E. (2008) Adaptation de la méthode des éléments discrets à l'échelle de l'ouvrage en béton armé : une approche couplée éléments discrets/éléments finis, PhD thesis, Université de Grenoble.

## G

- [Gabet *et al.*, 2006] Gabet T., Vu X.V., Malecot Y., Daudeville L. (2006), A new experimental technique for the analysis of concrete under high triaxial loading. *J. Phys IV*, Vol. 134, pp. 635-640.
- [Gabet *et al.*, 2008] Gabet T., Malecot Y., Daudeville L. (2008), Triaxial behaviour of concrete under high stresses: influence of the loading path on compaction and limit states. *Cement and Concrete Research*, Vol. 38 (3), pp. 403-412.
- [Gambarova and Rosati, 1996a] Gambarova P., Rosati G. (1996), Bond and splitting in reinforced concrete: test results on bar pull-out, *Materials and Structures*, Vol. 29(179), pp. 267–276.
- [Gambarova and Rosati, 1997] P. Gambarova et G. Rosati (1997), Bond and splitting in bar pull-out: behavioural laws and concrete cover role, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 49(179) pp. 99–110.
- [Gawin *et al.*, 1999] Gawin, D., C. Majorana, and B. Schrefler (1999), Numerical analysis of hygro-thermal behaviour and damage of concrete at high temperature. *Mechanics of Cohesive-frictional Materials*, Vol. 4(1), pp. 37-74.
- [Gawin *et al.*, 2002] Gawin, D., F. Pesavento, and B. Schrefler (2002), Modelling of hygro-thermal behaviour and damage of concrete at temperature above the critical point of water. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 26(6), pp. 537-562.
- [Gelain and Vendel, 2008] Gelain, T., Vendel, J. (2008), Research works on contamination transfers through cracked concrete walls, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 238, pp. 1159–1165.
- [Giry *et al.*, 2011] Giry C, Dufour F., Mazars J. (2011), Stress-based nonlocal damage model, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 48 (25-26), pp. 3431-3443
- [Gran et Frew, 1997] Gran J. K. et Frew D. J., 1997. In-target radial stress measurements from penetration experiments into concrete by ogive-nose steel projectiles. *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 19, pp. 715-726.
- [Granger *et al.*, 2001] Granger L., Rieg C., Touret J-P., et al (2001). Containment Evaluation under Severe Accidents (CESA) : synthesis of the predictive calculations and analysis of the first experimental results obtained on the Civaux mock-up, *Nuclear Engineering and Design.*, Vol. 209, pp.155-163
- [Grassl *et al.*, 2010] P. Grassl, H. S. Wong, N. R. Buenfeld (2010), Influence of aggregate size and volume fraction on shrinkage induced micro-cracking of concrete and mortar, *Cement and Concrete Research*, Vol. 40 (1), pp. 85-89.
- [Greiner et Ramm, 1995] Greiner, U., Ramm, W. (1995), Air leakage characteristics in cracked concrete. *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 156, pp. 167–172.

## H

- [Habel, 2004] Habel K. (2004) Structural behavior of elements combining ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC) and reinforced concrete, EPFL PhD thesis.
- [Hanžič et Ilić, 2003] Hanžič, L. et Ilić, R. (2003), Relationship between liquid sorptivity and capillarity in concrete, *Cement and concrete research*, Vol. 33, pp. 1385-1388.
- [Hentz *et al.*, 2004] Hentz S., Donzé F-V. et Daudeville L. (2004), Identification and validation of a discrete element model for concrete. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 130(6), pp. 709-719.

[Herrmann *et al.*, 2009] Herrmann N., Gerlach L., Müller H.S., Le Pape Y., Bento C., Niklasch C. and Kiefer D. (2009) PACE-1450 - Experimental investigation of the crack behaviour of prestressed concrete containment walls considering the prestressing loss due to aging, 20th Int. Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 20) Espoo, Finland, August 9-14, SMiRT 20-Division 1, Paper 1671.

[Hillerborg *et al.*, 1976] Hillerborg A., Modeer M. & and Petersson P., (1976) Analysis of crack formation and growth in concrete means of fracture mechanics and finite elements, *Cement and Concrete Research*, Vol. 6, pp. 773-782.

## J

[Jourdain *et al.*, 2014] Jourdain X, Colliat J-B, De Sa C, Benboudjema F, Gatuingt F. (2014) Upscaling permeability for fractured concrete: meso-macro numerical approach coupled to strong discontinuities, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 38(5), pp. 536-50.

## K

[Kammouna *et al.*, 2017] Kammouna Z., Briffaut M., Malecot Y. (2017) Mesoscopic simulations of concrete strains incompatibilities under high creep stress level and consequences on the mechanical properties, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 1-15.

[Kollek, 1989]Kollek J.J. (1989) The determination of the permeability of concrete to oxygen by the CemBureau method – a recommendation, *Materials and Structures*, Vol. 22(3), pp. 225-230

[Kozicki et Donzé, 2010] Kozicki J., Donzé F-V (2010) A new open-source software developed for numerical simulations using discrete modeling methods, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 197 (49-50), pp. 4429-4443

[Krieg, 1978] Krieg R.D. (1978) A simple constitutive description for soils and crushable foams, SC-DR-72-0883 , Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, 1978.

## L

[Lugiez *et al.*, 1970] Lugiez F, Beaujoint N, Hardy X. (1970) L'auscultation des barrages en exploitation au service de la production hydraulique d'Électricité De France, des principes aux résultats, Xth International congress on large dams. Montréal, pp. 577–600 [in French].

## M

[Mariotti *et al.*, 2003] Mariotti C., Perlat J. et Guerin, J. (2003) A numerical approach for partially saturated geomaterials under shock, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 28, pp. 717 - 741.

[Masson and Corbin, 2016] Masson B., Corbin M. (2016), Vercors Mockup, First experimental results and synthesis of the Benchmark, Conference segment on Service Life of Cement-Based Materials and Structures, Lyngby, Denmark.

[Matallah and Laborderie, 2016] Matallah M. et Laborderie C. (2016), 3D Numerical modeling of the crack-permeability interaction in fractured concrete, 9th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures (Framcos 9), Berkley, USA.

[Meziani et Skoczylas, 1999] Meziani H. Skoczylas F. (1999) An experimental study of the mechanical behaviour of a mortar and of its permeability under deviatoric loading, *Materials and Structures*, Vol. 32 (6), pp. 403-409.

- [Momayez *et al.*, 2005] Momayez A, Ehsani M.R., Ramezani pour A.A., Rajaie H. (2005), Comparison of methods for evaluating bond strength between concrete substrate and repair materials, *Cement Concrete Res*, Vol. 35(4), pp. 748–57.

---

**N**

- [Nagano *et al.*, 1989] Nagano, T., Kowada, A., Matumura, T., Inada, Y., Yajima, K., (1989), Experimental study of leakage through residual shear cracks on r:c walls. *Proceedings of the SMIRT-10*, pp. 139–144.
- [Nguyen *et al.*, 2010] Nguyen, T., Lawrence, C., La Borderie, C., Matallah, M., Nahas, G. (2010) A mesoscopic model for a better understanding of the transition from diffuse damage to localized damage, *European Journal of Environment and Civil Engineering*, Vol. 14, pp. 751-776.
- [Nierenberger *et al.*, 2012] Nierenberger M., Poncelet M., Pattofatto S., Hamouche A., Raka B., Virely J.M. (2012), Multiaxial testing of materials using a Stewart platform: case study of the Nooru- Mohamed test, *Exp. Tech.*, Vol. 38(2), pp.74–83.
- [Niklasch et Herrmann, 2009] Niklasch C., Herrmann N. (2009) Nonlinear fluid-structure interaction calculation of the leakage behaviour of cracked concrete walls, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 239, pp. 1628-1640
- [Nooru-Mohamed *et al.*, 1993] Nooru-Mohamed M.B., Schlangen E., van Mier J.G.M. (1993), Experimental and numerical study on the behavior of concrete subjected to biaxial tension and shear, *Adv. Cem. Based Mater.*, Vol. 1 (1) pp. 22–37.
- [Nooru-Mohamed, 1992] Nooru-Mohamed M.B., Mixed-Mode Fracture of Concrete: An Experimental Approach, Technische Universteit Delft, 1992.

---

**O**

- [Omar, 2015] Omar A. (2015) Développement et validation d'un modèle aux éléments discrets de comportement du béton sous chargement dynamique. PhD thesis, Université de Grenoble.

---

**P**

- [Penot *et al.*, 2005] Penot I, Daumas B, Fabre JP. (2005) Monitoring behaviour. *Int Water Power Dam Constr*, pp. 24–27.
- [Picandet 2001] Picandet V., Influence d'un endommagement mécanique sur la perméabilité et sur la diffusivité hydrique des bétons, Thèse de Doctorat, Université de Nantes, 2001.
- [Pijaudier-Cabot et Bažant, 1987] Pijaudier-Cabot G. et Bažant Z.P. (1987) Nonlocal damage theory, *Journal of engineering mechanics*, Vol. 113 (10), pp. 1512-1533.
- [Piotrowska *et al.*, 2016] Piotrowska E., Forquin P., Malecot Y. (2016), Experimental study of static and dynamic behavior of concrete under high confinement: Effect of coarse aggregate strength, *Mechanics of Materials*, Vol. 92, pp. 164–174
- [Piotrowska *et al.*, 2014] Piotrowska E., Malecot Y., Ke Y. (2014), Experimental investigation of the effect of coarse aggregate shape and composition on concrete triaxial behaviour, *Mechanics of Materials*, Vol. 79, pp. 45-57.
- [Pleinert *et al.*, 1998] Pleinert H., Sadouki H. et Wittmann F.H., Determination of moisture distributions in porous building materials by neutron transmission analysis, *Materials and Structures*, Vol. 31, pp. 218-224.
- [Poinard *et al.*, 2010] Poinard C., Malecot Y., Daudeville L. (2010), Damage of concrete in a very high stress state: experimental investigation, *Materials and Structures*, Vol. 43, pp. 15-29.
- [Pontiroli *et al.*, 2010] Pontiroli C., Rouquand A. & Mazars, J. (2010), Predicting concrete behavior from quasi-static loading to hypervelocity impact. An overview of the PRM Model., *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, Vol. 14 (6-7), pp. 703-727.

## R

- [Ranaivomanana *et al.*, 2013] Ranaivomanana N., Multon S., Turatsinze A. (2013), Tensile, compressive and Flexural basic creep of concrete at different stress levels, *Cement and concrete research*, Vol 52, pp.1-10.
- [Rastiello *et al.*, 2014] Rastiello G, Boulay C, Dal Pont S, Tailhan JL, Rossi P. (2014), Real-time water permeability evolution of a localized crack in concrete under loading, *Cement and Concrete Research*, Vol. 56, pp. 20-28.
- [Rastiello *et al.*, 2014] Rastiello G., Boulay C., Dal Pont S., Tailhan J.L. Rossi P. (2014), Real-time water permeability evolution of a localized crack in concrete under loading, *Cement and Concrete Research*, Vol. 56, pp. 20-28
- [Rastiello *et al.*, 2015] Rastiello G, Tailhan JL, Rossi P, Dal Pont S. (2015) Macroscopic probabilistic cracking approach for the numerical modelling of fluid leakage in concrete, *Annals of Solid and Structural Mechanics*, Vol. 7(1) pp.1-16.
- [Rastiello *et al.*, 2016] Rastiello G., Desmettre C., Tailhan J.L., Rossi P., Charron J.P., Dal Pont S. (2016), Modeling of fluid leakage through multi-cracked RC structural elements using a numerical probabilistic cracking approach, *Materials and Structures* Vol. 49, pp. 3095–3108.
- [Riva *et al.*, 1999] Riva, P., Brusa, L., Contri, P., Imperato, L. (1999), Prediction of air and steam leak ratethrough cracked reinforced concrete panels, *Nuclear Engineering and Design* Vol. 192, pp. 13–30.
- [Rizkalla *et al.*, 1984] Rizkalla, S.H., Lau, B.L., Simmonds, S.H. (1984), Air leakage characteristics in reinforced concrete, *J. Struct. Eng. (ASCE)*, Vol. 110 (5), pp. 1149–1162.
- [Rossi, 1991] Rossi P. (1991), A physical phenomenon which can explain the mechanical behaviour of concrete under high strain rates, *Materials and Structures*, Vol. 24(6), pp. 422- 424.
- [Roubin *et al.*, 2015] Roubin E., Vallade A., Benkemoun N., Colliat J.B. (2015) Multi-scale failure of heterogeneous materials: A double kinematics enhancement for Embedded Finite Element Method, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 52, pp. 180-196.
- [Rousseau *et al.*, 2008] Rousseau J., Frangin E., Marin P., Daudeville L. (2008), Damage prediction in the vicinity of an impact on a concrete structure: a combined FEM/DEM approach, *Computers and Concrete*, Vol. 5 (4), pp.343-358
- [Rousseau *et al.*, 2009] Rousseau J., Frangin E., Marin P., Daudeville L. (2009) Multidomain finite and discrete elements method for impact analysis of a concrete structure, *Engineering structures*, Vol. 31 (11), pp. 2735-2743

## S

- [Saliba *et al.*, 2012] Saliba J., Loukili A., Grondin F. et Regoin J.-P. (2012) Experimental study of creep-damage coupling in concrete by acoustic emission technique, *Materials and Structures*, Vol. 45 (9), pp. 1389-1401.
- [Schmidt *et al.*, 2009] Schmidt M. J., Cazacu O. et Green M. L., 2009. Experimental and theoretical investigation of the high-pressure behaviour of concrete. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 33, pp. 1-23.
- [Schmidt, 2003] Schmidt M. J., 2003. High pressure and high strain rate behaviour of cementitious materials : experiments and elastic/viscoplastic modelling, PhD dissertation, University of Florida.
- [Sedighi-Gilani *et al.*, 2012] Sedighi-Gilani, M., Griffa, M., Mannes, D., Lehmann, E., Carmeliet, J., and Derome, D. (2012), Visualizing and quantification of liquid transport in softwood by means of neutron radiography, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, pp. 6211-6221.
- [Sedighi-Gilani *et al.*, 2013] Sedighi-Gilani, M., Ghazi Wakili, K., Koebel, M., Hugi, E., Carl, S., and Lehmann, E. (2013), Visualizing moisture release and migration in gypsum plaster board during and beyond dehydration by neutron radiography, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 60, pp. 284-290.
- [Setra, 2007] S etra, MEMOAR, Guide for construction on bridges, septembre 2007.

- [Shiu *et al.*, 2009] Shiu W.-J., Donzé F.-V. et Daudeville L. (2009). Discrete element modelling of missile impacts on a reinforced concrete target. *International Journal of Computer Applications Inn Technology*, Vol.34, pp. 33-41.
- [Sibille *et al.*, 2007] Sibille L., Donzé F.-V., Nicot F., Chareyre B., Darve F. (2007), From bifurcation to failure in a granular material: a DEM analysis, *Acta Geotechnica*, Vol. 3 (1), 15-24
- [Smilauer et Chareyre, 2010] Smilauer V., Chareyre B. 2010, Yade dem formulation
- [Sousa Coutinho 1969] Sousa Coutinho A. (1969), Note sur la rupture du béton maintenu à une contrainte constante, *Matériaux et Constructions*, Vol. 2 (1) pp. 49-57.
- [Sousa Coutinho, 1977] Sousa Coutinho A. (1977), A contribution to the mechanism of concrete creep, *Mat. Constr.*, Vol. 10 (1) pp. 3-16.
- [Stamati *et al.*, 2018] Stamati O., Roubin E., Andò E., Malecot Y. (2018), Phase segmentation of concrete x-ray tomographic images at meso-scale: Validation with neutron tomography, *Cement and Concrete Composites*, under press, 2018
- [Stavropoulou *et al.*, 2017] Stavropoulou E., Briffaut M., Dufour F., Boulon M., Camps G. (2017), A new apparatus for testing the delayed mechanical behaviour of interfaces: The Shearing Interfaces Creep box (SInC box), *Comptes rendus de l'académie des sciences (mécanique)*, Vol. 345(6), pp. 417-424.
- [Suzuki *et al.*, 1992] Suzuki, T., Takiguchi, K., Hotta, H. (1992), Leakage of gas through concrete cracks, *Nuclear Engineering and Design* Vol. 133, pp. 121–130.
- [Swenson et Taylor, 1983] Swenson D. V. et Taylor L. M. (1983). A finite element model for the analysis of tailored pulse stimulation of boreholes, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 7, pp 469-484.

<b>T</b>
----------

- [Tang *et al.*, 2016] Tang S. B., Wang S. Y., Ma T. H., Tang C. A., Bao C. Y., Huang X, Zhang H. (2016), Numerical study of shrinkage cracking in concrete and concrete repair systems, *Int J Fract*, Vol.199, pp. 229–244.
- [Tatin *et al.*, 2015] Tatin M., Briffaut M., Dufour F., Simon A., Fabre J.P. (2015), Thermal displacements of concrete dams: Accounting for water temperature in statistical models, *Engineering Structures*, Vol. 91, pp. 26–39
- [Tatin *et al.*, 2018] Tatin M., Briffaut M., Dufour F., Simon A., Fabre J.P. (2018), Statistical modeling of thermal displacements for concrete dams : Influence of water temperature profile and dam thickness profile, *Engineering Structures*, Vol 165, pp. 63-75.
- [Tatin, 2014] Tatin M. (2014), these Comportement thermique des barrages en béton : amélioration des modèles d'analyses physico-statistiques des mesures de déplacements, PhD thesis, Université De Grenoble.
- [Tayeh *et al.*, 2012] Tayeh B.A., Abu Bakar B.H., M.A. Megat Johari M.A., Voo Y. L. (2012), Mechanical and permeability properties of the interface between normal concrete substrate and ultra-high performance fiber concrete overlay, *Construction and Building Materials* Vol. 36, pp. 538–548.
- [Terzaghi, 1925] Terzaghi C. 1925. Principles of Soil Mechanics. Engineering News-Record, Vol. 95, pp.19-27.
- [Timoshenko et Goodier, 1970] Timoshenko S.P., Goodier J.N Theory of elasticity, McGraw-Hill, 1970.
- [Tixier, 2013] Tixier, Analyse du comportement de l'interface acier-béton pas essai push-in. Mesures par fibres optiques et modélisation par éléments finis, Université De Grenoble, 2013
- [Toropovs *et al.*, 2015] Toropovs, N., Lo Monte F., Wyrzykowski, M., Weber, B., Sahmenko, G., Vontobel, P., Felicetti, R., and Lura P., Real-time measurements of temperature, pressure and moisture profiles in High-Performance Concrete exposed to high temperatures during neutron radiography imaging, *Cement and Concrete Research*, Vol. 68, pp. 166–173.
- [Torre-Casanova *et al.*, 2012] A. Torre-Casanova, L. Jason, L. Davenne, X. Pinelli (2012) Confinement effects on the steel-concrete bond strength and pull-out failure, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 97, pp.92–104.



**V**

- [Van der Heijden *et al.*, 2009] Van der Heijden, G.H.A., Huinink, H.P., Pel, L., and Kopinga, K. (2009), Non-isothermal drying of fired-clay brick, an NMR study, *Chemical Engineering Science*, Vol. 64, pp. 3010-3018.
- [Van der Heijden *et al.*, 2011] Van der Heijden, G.H.A., Pel, L., Huinink, H.P., and Kopinga, K., Moisture transport and dehydration in heated gypsum, an NMR study, *Chemical engineering science*, Vol. 66, pp. 4241-4250.
- [Van der Heijden *et al.*, 2012] Van der Heijden, G.H.A., Pel, L., and Adan, O.C.G. (2012), Fire spalling of concrete, as studied by NMR, *Cement and Concrete Research*, Vol. 42, pp. 265-271.
- [Vidal *et al.*, 2015] Vidal T., Sellier A., Ladaoui W., Bourbon X. (2015), Effect of Temperature on the Basic Creep of High-Performance Concretes Heated between 20 and 80°C, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 27(7), pp. .
- [Vu *et al.*, 2009a] Vu X.H., Malecot Y., Daudeville L., Buzaud E. (2009), Effect of the water/cement ratio on concrete behaviour under extreme loading. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 33, pp. 1867-1888.
- [Vu *et al.*, 2009b] Vu X.H., Malecot Y., Daudeville L., Buzaud E. (2009), Analysis of concrete behaviour under high confinement: Effect of the saturation ratio. *International J. of Solids and Structures*, Vol. 46 (5), pp. 1105-1120.
- [Vu *et al.*, 2011] Vu X.H., Daudeville L., Malecot Y. (2011), Effect of coarse aggregate size and cement paste volume on concrete behaviour under high triaxial compression loading. *Construction and Building Materials*, Vol. 25 (10), pp. 3941–3949.

**W**

- [Weber *et al.*, 2013] Weber, B., Wyrzykowski, M., Griffa, M., Carl, S., Lehmann, E., and Lura, P., Neutron radiography of heated high-performance mortar, In MATEC Web of Conferences, Vol. 6, p. 03004), EDP Sciences.
- [Willm et Beaujoint, 1967] Willm G, Beaujoint N. (1967) Les méthodes de surveillance des barrages au service de la production hydraulique d'Électricité De France. IXth International congress on large dams. Istanbul, pp. 529–50 [in French].
- [Wu *et al.*, 2015] Wu Z., Wong H., Buenfeld N. (2015), Influence of drying-induced microcracking and related size effects on mass transport properties of concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 68 (Supplement C).

**Y**

- [Yurtdas *et al.*, 2004] Yurtdas I., Burlion N. et Skoczylas F. 2004. Triaxial mechanical behaviour of mortar : Effects of drying. *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, pp. 1131-1143.

**Z**

- [Zeilinger et Huebner, 1976] Zeilinger, A., and Huebner, R. (1976), Measurement of moisture motion under a temperature gradient in a concrete for SNR-300 using thermal neutrons, *Kerntechnik*, Vol. 18, pp.119–125.
- [Zhou *et al.*, 2008] Zhou J, Ye G, Schlangen E, van Breugel K. (2008) Modelling of stresses and strains in bonded concrete overlays subjected to differential volume changes, *Theor. Appl. Fract. Mec.*, Vol. 49, pp.199–205.
- [Zingg *et al.*, 2016] Zingg L., Baroth J., Briffaut M., Malecot Y. (2016), Influence of cement matrix porosity on concrete triaxial behaviour, *Cement and Concrete Research*, Vol. 80, pp. 52-59.
- [Zingg, 2013] Zingg L. 2013 , Influence de la porosité et du degré d'humidité interne sur le comportement triaxial du béton, PhD thesis, Université De Grenoble.
- [Zukas, 1992] Zukas J.A. 1992. Penetration and perforation of solids. Impact Dynamics.

<b>v. Annexes :</b>
---------------------

**CV**

Briffaut                                      Matthieu  
 Date de naissance :    23/06/1983 (34ans)                                      Grade : MCF  
 Situation familiale : Marié, 3 enfants  
 Etablissement d'affectation : Université Grenoble Alpes, Laboratoire 3SR, Grenoble

*Parcours professionnel :*

**Maitre de conférences (2011 - ...)** à l'université Grenoble Alpes.

*Laboratoire de recherche* : 3SR (Equipe RV : Risques, Vulnérabilité des structures et comportement mécanique des matériaux) ; **9 Thèses encadrées et soutenues ; 2 thèses en cours** (dont 1 dont la soutenance est prévue avant le fin 2018) ; 3 post doc et 11 stages de M2R encadrés.

*Unité d'enseignement* : UFR Phitem (Physique, Ingénierie, Terre, Environnement, mécanique) env. 250h eq. TD / an.

- *Lauréat de la Prime d'encadrement doctoral et de recherché (PEDR) depuis 2015*
- *Membre de la **Rilem et du Technical Committee CMS** Thermal cracking of massive concrete structures. « State of the art » en cours d'écriture.*
- *Membre **COST Action TU1404** "Towards the next generation of standards for service life of cement-based materials and structures" (co-leader du GP 2c : Macroscopic Modelling)*
- Membre nommé (2011-2013) puis membre élu (2013- ) du **conseil scientifique du laboratoire 3SR.**
- Membre nommé du **conseil scientifique de la Chaire Pereniti** (Titulaire F. Dufour)
- Responsable scientifique d'un dispositif expérimental : Boîtes de cisaillement tridimensionnelle.

**Stage Post Doctoral au CEA (2011)** (Commissariat à l'Energie Atomique) de Saclay au sein du Laboratoire d'Etude du comportement des bétons et des argiles (LECBA) sous la responsabilité de V. L'Hostis (Sujet : Evolution et rôle des produits de corrosion dans les structures en béton armé sous l'action des chlorures).

**Docteur de l'ENS de Cachan (2010)** (laboratoire **LMT Cachan** ; directeur de thèse M. Torrenti) en collaboration avec l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN) : mention Très honorable (Titre : Etude de la fissuration au jeune âge des structures massives en béton : influence de la vitesse de refroidissement, des reprises de bétonnage et des armatures).

**Agrégation de Génie Civil (2007)** option **Structures et ouvrages** (rang : 7) préparée à l'Ecole Normale Supérieure (ENS) de Cachan (élève **Normalien**).

**Diplôme d'Ingénieur de Production** (2006) de l'Institut Supérieur Aquitain du Bâtiment et des Travaux Publics (ISA-BTP) option travaux publics à Anglet (classement : 2/26).

**Diplôme Universitaire Technologique** (DUT) de Génie civil (2003), option Travaux Publics de Strasbourg.

## Activités pédagogiques

**Responsable du master 1 GCI à Phitem** (Depuis 2016 - ....) Cette responsabilité consiste à présider les jurys de semestre, à construire les emplois du temps, à donner un avis sur le dossier des candidats à l'intégration du M1 (universités françaises et étrangères, env. 700 dossiers en 2017), à gérer les dossiers de poursuites d'études et à répondre aux multiples et diverses demandes des étudiants.

**Co-responsable du master 1 GCI à Phitem** (années 2014-2016) suite au départ en CRCT de S. Grange pour une durée de 6 mois.

### Responsable d'Unité d'Enseignement :

- L3 : Calculs règlementaires (9 ECTS), Bureau d'études (3ECTS) ;
- M1 : ouvrages géotechniques (3 ECTS)
- Jury de semestre (2012 - ..) : L3 (Semestre 6) ; M1 (Semestre 7 et 8)

### Charge d'enseignement :

Année scolaire Volume enseignement (heures eq. TD) réalisé

**2011-2012** : 170.5 (CM : 31.5; TD :120 ; TP :19 )

**2012-2013** : 217 (CM : 29.25; TD :142 ; TP : 46)

**2013-2014** : 275.75 (CM :42.75 ; TD :165 ; TP :68 )

**2014-2015** : 241.25 (CM :42.75 ; TD :136.5 ; TP : 62)

**2015-2016** : 242 (CM :43; TD :137; TP : 62)

**2016-2017** : 320 (CM :45; TD :189; TP : 86)

Actuellement mes enseignements concernent le béton armé, la construction mixte, les ouvrages géotechniques et le monitoring d'ouvrages pour lesquels je dispense les cours magistraux, les travaux dirigés et certains travaux pratiques. Je m'investis également dans le suivi de projets pluridisciplinaires (M1) et dans le tutorat de stage en entreprise (L3 et M2).

## Responsabilités administratives en lien avec la recherche

Mes travaux de recherche sont menés dans un cadre collaboratif fort, avec des financements industriels et académiques. Dans deux projets, je suis porteur du projet et responsable scientifique alors que dans les cinq autres contrats, mon rôle est participatif (participation aux réunions de suivi et interactions avec le partenaire industriel):

**Responsable partenaire** (porteur du projet et responsable scientifique) pour le laboratoire dans le projet Macena (Projet d'investissement d'avenir : Recherche en matière de sûreté nucléaire et de radioprotection) : Aide pour le laboratoire sur la durée du projet (2013-2017) : **373 k€**

Le projet Macena est un projet qui concernent deux thèses (plus un post-doctorant à recruter en 2016) : la thèse de M. El Dandachy et la thèse de M. Ghanoum (directeur de thèse J. Baroth, encadrant de thèse : C. Rospars). L'aide obtenue permet le financement des salaires des doctorants (et post-doc), les missions et frais de fonctionnement ainsi que le développement d'un banc de perméabilité nécessaire à la partie expérimentale de la thèse de M. El Dandachy. Ce projet fait suite à l'appel à projet RSNR et est géré par l'ANR.

Lauréat de l'appel à Projet Grenoble Innovation Recherche 2013 (porteur et responsable scientifique) (**AGIR : G-INP / UJF**) : **15k€**

Le projet Agir 2013 (durée : 2ans, AAP d'établissements grenoblois) a permis d'offrir un support financier pour la partie expérimentale de la thèse de Z. Kammouna.

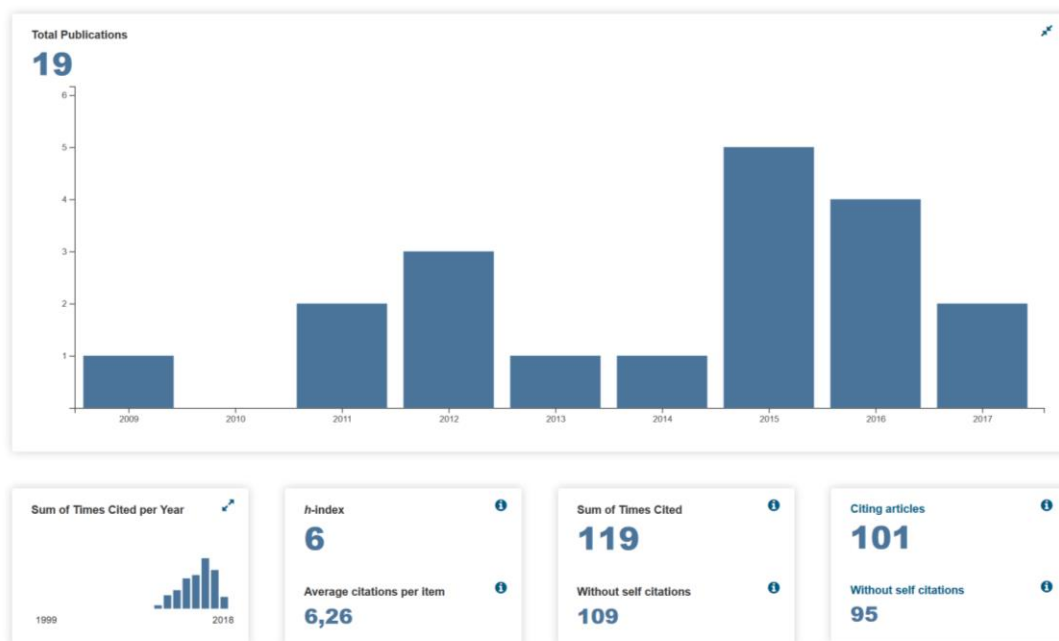
Contrat industriel (participation) :

- Cifre EDF/DTG (Thèse M. Tatin 2011-14)) : **36k€**
- Contrat de thèse ANDRA (Thèse Eleni Stavropoulou (2014-17): **125k€**
- Contrat de thèse IRSN (Thèse D. X. Vu (2010 -13)): **96k€**
- Chaire EDF/INP (Thèse B. El Marabi (2014-18) et M. Boucher (2013-16)): **1,5M€**
- Contrat CEA-Gramat (thèse L. Zingg (2010-13): **714k€**

**Implication dans l'équipe de recherche/laboratoire :**

- Organisateur des séminaires d'équipe
- Inventaire parc informatique de l'équipe
- Correspondant site web de l'équipe,
- Chargé de mission pour la préparation au déménagement vers le nouveau bâtiment du laboratoire,
- Responsable scientifique salle de coulage du béton et de la BCR3D,
- Correspondant INSIS pour le laboratoire.

## Liste des publications



Source : Web of science

### 1. Revue internationale à comité de lecture

1. Briffaut M., Benboudjema F., Torrenti J.M., Nahas G. (2011), Numerical analysis of the thermal active restrained shrinkage ring test to study the early age behavior of massive concrete structures, *Engineering Structures*, Vol. 33 (4), pp. 1390-1401, IF=2.205.
2. Briffaut M., Benboudjema F., Torrenti J.M., Nahas G. (2011), A thermal active restrained shrinkage ring test to study the early age concrete behaviour of massive structures, *Cement and Concrete Research*, Vol.41 (1), pp. 56-63. IF = 4.516.
3. Briffaut M., Benboudjema F., Torrenti J.M., Nahas G. (2012), Analysis of semi-adiabatic tests for the prediction of early-age behavior of massive concrete structures, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 34 (5), pp. 634-641. IF = 3.33.
4. Briffaut M., Benboudjema F., Torrenti J.M., Nahas G. (2012), Concrete early age basic creep: Experiments and test of rheological modelling approaches, *Construction and Building Materials*, Vol. 36, pp. 373-380, IF=1.953.
5. Briffaut M., Benboudjema F., Torrenti J.M., Nahas G. (2012), Effects of early-age thermal behaviour on damage risks in massive concrete structures, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, Vol. 16 (5), pp. 589-605. IF = 0.504.
6. Briffaut M., Benboudjema, F.; Laborderie, C., Torrenti J.M. (2013), Creep Consideration Effect on Meso-Scale Modeling of Concrete Hydration Process and Consequences on the Mechanical Behavior, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 139 (12), pp.1808-1817, IF = 0.987 .

7. Baroth J., Malecot Y., Boukria Z., Briffaut M., Daudeville L. (2015), Prediction of the perforation of targets impacted by deformable projectiles, , International Journal of Impact Engineering, Manuscript, Volume: 80 Pages: 36-44, IF=2.29.
8. Tatin M., Briffaut M., Dufour F., Simon A., Fabre J.P. (2015) Thermal, Displacements of Concrete Dams: Accounting for Water Temperature in Statistical Models, Vol. 91, pp. 26-39, Engineering Structures, IF=1.893.
9. Vu X.D., Briffaut M., Malecot Y., Daudeville L., Cirée B (2015), Influence of the saturation ratio on concrete behavior under triaxial compressive loading (Article Number: 976387), Science and Technology of Nuclear Installations, (IF = 0.811)
10. Zingg L., Baroth J., Briffaut M., Malecot Y. (2016), Influence of cement matrix porosity on concrete triaxial behaviour, Cement and Concrete Research, Volume: 80 Pages: 52-59 (IF = 3.48)
11. Zingg L., Malecot Y., Briffaut M., Baroth J., Pla S. (2016), A radial sensor for the characterization of concrete under high confinement, Experimental mechanics, Vol. 56(5) , pp.703-711 (IF = 1.764)
12. Briffaut M., Benboudjema F., D'Aloia L. (2016), Effect of fibres on early age cracking of concrete tunnel lining. Part I: Laboratory ring test, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 59, pp. 215-220 (IF = 1.741)
13. Briffaut M., Benboudjema F., D'Aloia L. (2016), Effect of fibres on early age cracking of concrete tunnel lining. Part II: Numerical simulations, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 59, pp. 221-229 (IF = 1.741)
14. Ezzedine El Dandachy M., Briffaut M., Dal Pont S. , Dufour F. (2016) Induced Anisotropic Gas Permeability of Concrete due to Coupled Effect of Drying and Temperature, Key Engineering Materials 711, 871-878 (IF = 0.41)
15. Ezzedine El Dandachy M., Briffaut M., Dufour F., Dal Pont S. (2017) An original semi-discrete approach to assess gas conductivity of concrete structures Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech., Vol. 41(6), pp. 940-956 (IF = 1.758)
16. Kammouna Z, Briffaut M., Malecot Y. (2017), Mesoscopic simulations of concrete strains incompatibilities under high creep stress level and consequences on the mechanical properties, European Journal of Environmental and Civil Engineering, published online (IF = 0.504)
17. Stavropoulou E., Briffaut M., Dufour F., Boulon M., Camps G., A new apparatus for testing the delayed mechanical behaviour of interfaces: The Shearing Interfaces Creep box (SInC box) COMPTES RENDUS MECANIQUE Volume: 345 Issue: 6 Pages: 417-424 Published: JUN 2017
18. Tatin M., Briffaut M., Dufour F., Simon A., Fabre J.P. (2018), Statistical modeling of thermal displacements for concrete dams : Influence of water temperature profile and dam thickness profile, Engineering Structures, Vol 165, pp. 63 -75, IF=1.893.
19. Stavropoulou E., Ando E., Tengattini A., Briffaut M., Dufour F., Atkins D., Armand G., Liquid water uptake in unconfined Callovo Oxfordian clay-rock studied with neutron and x-ray imaging, Acta Geotechnica, accepted, published online

20. Mazars J., Grange S., Briffaut M., Simplified modeling strategy for thermomechanical analysis of massive reinforced concrete structures at an early age, Applied Science (open acces), vol.8 (2018)

- 
21. Bouhjiti D.E.M, Boucher M., Briffaut M., Dufour F., Baroth J., Martinot F., Masson B., Accounting for realistic thermo-hydro-mechanical boundary conditions whilst modeling viscoelastic ageing of concrete in nuclear containment buildings at the scale of representative structural volumes, Engineering Structures, IF=1.893, **accepted**
  22. Bouhjiti D.E.M, Ezzedine El Dandachy M., Briffaut M., Dufour F., Baroth J., Dal Pont S., Masson B., Critical review of the description of concrete's damage-permeability coupling using continuous and regularized elastic-based damage models - New strain-based matching law, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, (IF = 1.758), soumis
  23. Bouhjiti D.E.M, Baroth J., Briffaut M., Dufour F., Masson B., Statistical modeling of cracking in large concrete structures under thermo-hydro-Mechanical loads : application to nuclear containment buildings, part 1 : Random field effects (Reference analysis), Nuclear Engineering and Design, (IF = 1.14), soumis
  24. Dauti D., Dal Pont S., Weber B., Briffaut M., Toropovs N., Wyrzykowski M., Sciumè G., Modeling Concrete Exposed to High Temperature: Impact of Dehydration and Retention Curves on Moisture Migration, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, (IF = 1.758), soumis
  25. Dauti D., Tengattini A., Dal Pont S., Toropovs N., Briffaut M., Weber B., Wyrzykowski M., Sciumè G. Analysis of moisture migration in concrete at high temperature through in-situ neutron tomography, Cement and Concrete Research, soumis.

#### Conférences internationales avec actes publiés et comité de lecture

1. Briffaut M., Benboudjema F., Torrenti J.M., Nahas G., Early age cracking in massive concrete structures\_an active ring test to study the effects of reinforcement and construction joints. FramCoS-7. 2010.
2. La Borderie C., Matallah M., Nguyen T.D., Briffaut M., Benboudjema F., Torrenti J.M. Hydration induced meso-stresses in concrete and their consequences on the cyclic behaviour AGS'10. 2010
3. Briffaut M., Benboudjema F., Nahas G., Torrenti J.M. A new device for the study of early-age cracking in massive concrete structures. SMIRT20 Structural Mechanics In Reactor Technology. 2009.
4. Briffaut M., Benboudjema F., Nahas G., Torrenti J.M. A new analysis of the restrained ring shrinkage test. NUCPERF 2009 EFC Event 317. 2009.
5. Tatin M., Briffaut M., Dufour F., Simon A., Fabre, JP, Rousset B. (2012), Thermal Deformation of Concrete Dams: Justification, Clarification and Improvement of Statistical Analysis, British Dams Society Conference 2012 Leeds, Angleterre, 12th - 15th September 2012 , org. British Dams Society
6. Briffaut M., Bonnet A., Bahrami B., Benboudjema F., D'Aloia L. (2012), Analysis of cracking due to shrinkage restraint in a concrete tunnel, Numerical modeling :

- Strategies for sustainable structures Aix en Provence, France, 29 May - 1 June 2012, SSCS proceedings, P. Rossi, J.L. Tailhan Ed., pp.171
7. Tatin M., Briffaut M., Dufour F., Simon A., Fabre, JP. (2013), Thermal Displacements of concrete dams : Finite element and statistical modelling, 9th ICOLD European Club Symposium Venise, Italie, April 10-12, 2013 , org. ITCOLD
  8. Vu X.D., Malecot Y., Daudeville L., Briffaut M., Ciree B. (2013), Concrete behavior under triaxial load : Experimentation and improvement of a damage and plasticity constitutive model for concrete, VIII International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, FraMCoS-8, J.G.M. Van Mier, G. Ruiz, C. Andrade, R.C. Yu and X.X. Zhang (Eds)
  9. Briffaut M., Benboudjema, F., Laborderie, C., Torrenti J.M. (2013), Consequences of internal stresses generated by hydration on the concrete mechanical behavior, VIII International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, FraMCoS-8, J.G.M. Van Mier, G. Ruiz, C. Andrade, R.C. Yu and X.X. Zhang (Eds)
  10. Briffaut M., Benboudjema F. (2013), Numerical Analysis of Cracking Induced by Drying Shrinkage in Concrete using a Mesoscopic Approach: Influence of Aggregates Restraint and Skin Effect Conference: Ninth International Conference on Creep, Shrinkage, and Durability Mechanics (CONCREEP-9)
  11. Malecot Y., Zingg L., Piotrowska E., Briffaut M., Daudeville L. (2014) , Mesoscopic modeling of triaxial behavior of concrete, Edited by: Bicanic N, Mang H, Meschke G., Conference: Euro-C Conference Location: St Anton am Alberg, Computational modelling of concrete, Vol. 1, pp. 199-207
  12. Briffaut M., El Danchachy M., Dal Pont S., Dufour F., Permeability analysis of the interface between concrete and rebars during push in test, SSCS proceedings, P. Rossi, J.L. Tailhan Ed., Rio de Janeiro, 2015
  13. Boucher M., Briffaut M., and Dufour F. (2015), Massive Structure Monitoring: Relevance of Surface Strain Measurement Proceedings of the 10th International Conference on Mechanics and Physics of Creep, Shrinkage, and Durability of Concrete and Concrete Structures, Edts :Christian Hellmich , Bernhard Pichler, Johann Kollegger, Viena.
  14. Ezzedine El Dandachy M., Briffaut M., Dufour F. and Dal Pont S. Numerical coupling between damage and gas permeability for concrete applied on a 3D splitting test, VI International Conference on Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering COUPLED PROBLEMS 2015 B. Schrefler, E. Oñate and M. Papadrakakis (Eds), Venise.
  15. Dufour F., Tatin M., Simon A., Briffaut M., Favre J.P., (2015) thermal displacements of concrete dams: accounting for water temperature profile in statistical model, second international Dam World conference, Lisbon, Portugal
  16. Beniou H., Malecot Y., Briffaut M., Daudeville L., (2015) A new discrete element constitutive behavior of concrete in the YADE platform, particles conference, Barcelona.
  17. Ezzedine El Dandachy M., Briffaut M., Dal Pont S. and Dufour F., (2016) Induced permeability anisotropy due to coupled effect of traction creep and temperature in concrete, international conference on concrete under severe conditions-environment & loading, Lecco.
  18. Kammouna Z., Briffaut M., Malecot Y., (2016) Residual concrete strength after sustained load: Experimental results and modelling approach International RILEM



- Conference on Materials, Systems and Structures in Civil Engineering Conference segment on Service Life of Cement-based Materials and Structures, 22-24 August 2016, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark
19. Dauti D., Weber B., Dal Pont S., Tengattini A., Toropovs N., Briffaut M., First results on fast neutron tomography of heated concrete, International workshop on concrete spalling due to fire exposure, Boras, Sweden (2017)
  20. Dauti D., Dal Pont S., Sciumè G., Briffaut M., Numerical benchmark of experiments on heated concrete Boras, Sweden (2017)
  21. El Dandachy M., Briffaut M., Dal Pont S., Dufour F., Effect of creep in traction and temperature on concrete permeability, Congrès Français de la mécanique, Lille, 2017.
  22. Stavropoulou E., Briffaut M., Dufour F., Camps G., Experimental characterisation of the mechanical properties of the Clay-Rock/Concrete interfaces and their evolution in time, Experimental mechanics, Indianapolis, 2017.
  23. Bouhji E., Briffaut M., Baroth J., Dufour F., Masson B., Mechanical modeling of the early age behavior of concrete in Nuclear Containment Buildings, 2nd International RILEM/COST Conference on Early Age Cracking and Serviceability in Cement-based Materials and Structures - EAC2, 12–14 September 2017, ULB-VUB, Brussels, Belgium
  24. Mazars J., Grange S., Briffaut M., A multifiber beam model for the thermo-mechanical analysis of RC structures : simulation of the ConCrack benchmark RG8 test, 2nd International RILEM/COST Conference on Early Age Cracking and Serviceability in Cement-based Materials and Structures - EAC2, 12–14 September 2017, ULB-VUB, Brussels, Belgium

Conférences nationales avec actes publiés et comité de lecture

1. Briffaut M., Benboudjema F., Torrenti J.M., Nahas G., Influence des armatures et des reprises de bétonnage sur la fissuration par retrait thermique du béton au jeune âge, XXVIII Rencontre Universitaire de Génie Civil, La Bourboule 2010.
2. Briffaut M., Benboudjema F., Torrenti J.M., Nahas G., Influence du comportement au jeune âge du béton sur les mécanismes de dégradation à long terme des structures massives. Conserbati 2010.
3. Briffaut M., Benboudjema F., Nahas G., Torrenti J.M. Etude expérimentale d'un béton au jeune âge et modélisation macroscopique associée. CFM 2009 - 19e Congrès Français de Mécanique. 2009.
4. Benboudjema F., Briffaut M., D'Aloia L., Baharami B. (2012), Etude du comportement au jeune âge de structures massives, XXXème Rencontre Universitaire de Génie Civil, Chambéry 2012.
5. Vu X.D., Malecot Y., Daudeville L., Briffaut M. (2012) Comportement du béton sous sollicitation de compression triaxiale : Experimentation et modélisation, XXXème Rencontre Universitaire de Génie Civil, Chambéry 2012.
6. Zingg L., Pla S., Decosne J.L., Malécot Y., Briffaut M., Baroth J. (2012) Caractérisation expérimentale du béton sous fort confinement : Mise au point d'un capteur de déformations radiales, XXXème Rencontre Universitaire de Génie Civil, Chambéry 2012

7. Briffaut M., Benboudjema, F. (2013) Etude à l'échelle mésoscopique des incompatibilités de déformation thermique et hydrique du béton : Effet de la prise en compte du fluage XXXI Rencontre Universitaire de Génie Civil, Cachan 2013
8. Tatin M., Briffaut M., Dufour F., Simon A., Fabre, JP. (2014), Déplacement d'origine thermique des barrages en béton : clarification et amélioration des analyses statistiques, Diagnobéton Toulouse, France, 19 -20 mars 2014 , org. LMDC
9. Briffaut M., Kammouna Z., Malecot Y., Analyse par approche numérique mésoscopique des propriétés mécaniques résiduelles du béton après un chargement de type fluage, XXXII Rencontre Universitaire de Génie Civil, Anglet 2015.
10. Ezzedine El Dandachy M., Briffaut M., Dufour F., Dal Pont S., (2015) Coupling by means of strong discontinuity approach between crack opening and gas permeability for concrete, Réponses des matériaux et des structures de Génie Civil aux sollicitations sévères, AFM, Association Française de Mécanique
11. Benniou H., Malecot Y., Briffaut M., Daudeville L., 2015, Un nouveau modèle discret de comportement du béton implanté sous YADE, Réponses des matériaux et des structures de Génie Civil aux sollicitations sévères, AFM, Association Française de Mécanique
12. El Dandachy M., Briffaut M., Dal Pont S., Dufour F., Effect of creep in traction and temperature on concrete permeability, Congrès Français de la mécanique, Lille, 2017.

### **Pré Projet ANR JCJC : Projet ConJoint**

Caractérisation expérimentale du comportement hydromécanique des reprises de bétonnage (extrait du pré-projet déposé en 2017 à l'ANR en tant que projet JCJC Conjoint disponible en Annexe)

The durability of concrete reinforced structures is, beyond the human aspect, a key economic issue for public authorities. Indeed, a large part of the national infrastructure like tunnels and bridges, which draw the urban landscape and are strategic paths for people and/or goods, was built about fifty years ago and is now exposed to heavy rehabilitation needs. In terms of durability, even if there is no visible cracking, it is well known by the organism in charge of structure inspection that construction joints, namely mechanical discontinuities existing inside the concrete material due to different casting operations or reparation events as described in the next paragraph, are key structural weak points as they are likely to create preferential flow paths for aggressive agents that may corrode the steel reinforcement [1]. Therefore, joints need to be carefully studied to avoid the premature degradation of the structure and/or to ensure a longer term service life of the repaired reinforced concrete structure.

Construction joints can be defined as the interface between two materials having different mechanical behaviors and cannot be avoided in concrete structures. The so called “initial construction joints” are due to a non-continuous casting of the concrete structures (especially encountered in massive structures like tunnels and bridges which require several casting sessions). In such a case, fresh concrete is cast on an already hardened concrete, both materials having different mechanical properties and behaviours. Another type of construction joint is observed after reparation operations: for instance when structures present concrete cover spalling due to steel corrosion or fire exposition, the concrete cover must be replaced. As in the previous case, the mechanical behavior of the new concrete cover will obviously be different from the “old” and eventually degraded concrete. In both situations, the differential mechanical behavior of the two concretes lead to shear stresses due to concrete shrinkages, and shear cracks may develop at the interface. Moreover, the casting process itself creates a more porous therefore more permeable zone where the circulation of corrosive fluids can be intense. Though the importance of the strength of the interface and its consequences on the joints resistance was demonstrated by Briffaut [2] and Bryne et al. [3] for concrete / concrete interface or concrete / rock interface respectively, the presence of construction joints is generally neglected in

the modelling of concrete massive structures (refs, the international Benchmark Vercors [4] and in [5]).

Consequently, this project aims at clarifying the hydro-mechanical behavior of construction joints under shear stress in order to develop predictive constitutive models based on the real geometry (accurate roughness) of the interface and on the mechanical behavior of the two materials. Indeed, a smooth interface will obviously have a low permeability but its resistance will also be low and the joint will be subjected to cracking. On the other hand, a too high roughness can also limit the interface strength by increasing the permeability, and because big asperities can be fragile and more subjected to failure.

In the literature, the interface between cementitious materials, especially between ultra-high performance concrete (UHPC) and normal concrete, has been studied to promote UHPC as a repairing material [6, 7] but the results are still incomplete. In particular, the assessment of the influence of the normal concrete roughness on mechanical strengths at the joint scale remains qualitative [8, 9] and permeability tests were only performed on unloaded interface [8]. In parallel, if the interfaces between concrete and steel rebar have been widely studied from a mechanical point of view [10-12], only a few experiments are available to describe the hydraulic behavior [13] which is yet strongly affected by the complex cracking path.

In the worldwide growing nuclear concern [14 - 21] and thanks to recent studies [22 - 24], the characterization and the modelling of the evolution of concrete hydraulic conductivity during the crack process has been substantially improved. However the model developed to predict the flow in a crack relies on a fine prediction of the crack opening process as observed in the traction failure mode only, i.e. mode I [25-27]. But reinforced concrete structures are also submitted to other failure modes, in particular shear modes, i.e. mode II, especially at the joints, where incompatible strains occur due to differential mechanical behavior and both thermal and drying shrinkage, generating possible delamination process [28, 29].

Because recent models do not take into account the whole set of parameters involved, in particular the roughness of the interface and its influence on the mechanical resistance to shear stress, they fail to predict the complex process leading to the evolution of the permeability at the joint and the circulation of aggressive fluids that could be responsible for localized corrosion site of steel reinforcements.

The first part of the project is devoted to the experimental characterization of the construction joint behavior under pure shear stress (mode II) thanks to a unique device available in the laboratory (called BCR3D) initially developed for studying rock joints and able to measure the evolution of the permeability of the material during tensile loading using a gas leakage technique. An accurate description of the construction joint roughness obtained by laser observations will give an explicit representation of the interface and will be correlated to the measured permeability. This first part will be accomplished by a PhD student. The final objective is to determine the optimum roughness of the joint that will give the best balance between mechanical strength and permeability and to provide a numerical model able to describe the shear behavior of interface including as input parameter the roughness of the interface.

The second part to be carried out by a post-doctoral student aims at validating the relevancy of the results obtained in part 1, and using them to complete the results described in the literature for specimen with no joint and a single crack. The strategy is to carry out the same permeability tests than those performed in part 1, but in a more complex and "close to real" situation. For this purpose, a steel reinforced concrete sample will be submitted to tension in presence of a construction joint being either perpendicular or inclined with respect to the tensile load axis, which is a more realistic situation. This second part should therefore clarify the effect of the lower strength located at the construction joint on the material's behavior and provide the first reference experimental data of gas leakage through a multi-cracked specimen.

Even if, preliminary mechanical tests on construction joints have already been performed with success using different quantity of deactivator to create different roughness, the obtaining of experimental results in terms of permeability cannot be, a priori, guaranteed. Therefore, some experimental data about hydro-mechanical behavior of construction joint can also be obtained with slant test (easier to

performed). Consequently, the second part of this project can also be performed if the first one is realized with some delays. The numerical part can count on experimental data on steel concrete interface obtained in the laboratory [13] and on Karlsruhe Mock up [30] for reinforced concrete specimen simulations.

The scientific environment of the project is given in figure 1a and the progress during the project period in figure 1b.

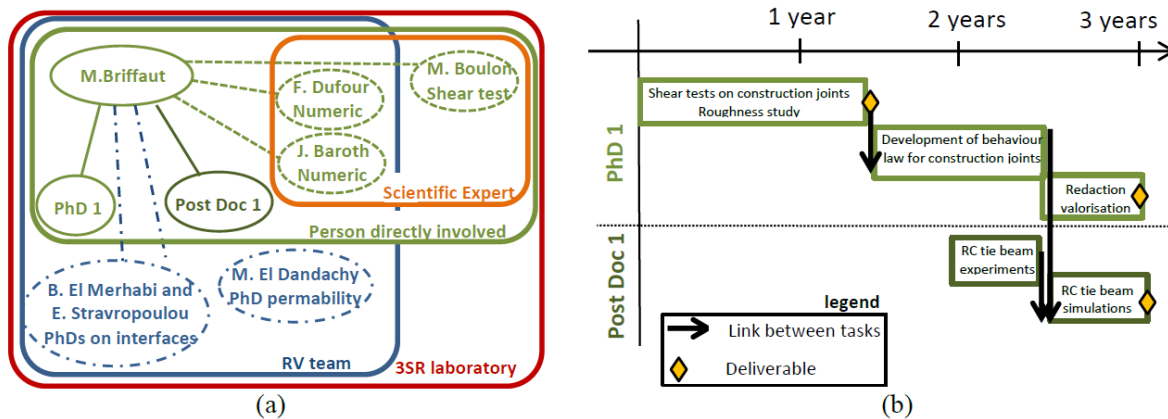


Figure 1: Scientific environment (a) and scientific expected progress of the project (b)

My capacity to perform numerical and experimental study (and to create the link between them) is obviously a necessity to carry out this project but I can also count on the scientific expertise of M. Boulon for shear test. F. Dufour and J. Baroth will be involved for numerical studies for respectively the development of joints models and for the modeling of reinforced concrete structural elements.

Impact and benefits of the projet (« Impact et retombées du projet »)

The mechanical behavior of materials is one of the thematic field for which the 3SR Laboratory has a growing international reputation and this project and its possible extension are an excellent opportunity to create a synergy between the 3 3SR teams and become a major transversal project that should set the laboratory up as a leader on this theme. Indeed, through the upgrading of available tools and knowledge (numerical and experimental ones), the long term state objective is to carry out this topic as major and strategic for the laboratory 3SR.

As for any research project, the valorization of the scientific results will be achieved by means of scientific papers in peer-review journals (Cement and concrete research, Engineering structures, Restoration of buildings and Monuments,...) and presentations in international conferences such as FRAMCOS or CONSEC. The natural diffusion of the knowledge and the developments through the European scientific network created by the Cost action TU1404 "Towards the next generation of standards for service life of cement-based materials and structures" and towards important French actors of the worldwide massive construction users and supervisors (EdF, IRSN, CETU, ANDRA) is obviously expected. These key players are all partners in current or past collaborations with the project manager. Finally but more importantly, the organization of a final-term workshop widely open to the scientific community but addressed to key invited industrial players (practitioners) can be seen as a solid base for further collaborations and transfer to industry by recommendations for concrete joints treatments (between new concretes or for reparations).

The results of this project will enable the civil engineering sector to relevantly take into account the problem of joints and interfaces in construction operations:

On the one hand, durable repair of already damaged structures will be helped by dint of a better comprehension of the (hydro-) mechanical behavior of the interface between old and fresh concrete. The concept of the optimal roughness of the joints is a key expected results to provide to practitioners the conditions of optimized and durable repair. Integrating this information into numerical models serve as a tool for engineers to predict the ultimate load stability after repairing and eventually allows a structure requalification. On the other hand, for new or recent urban mobility strategic structures an accurate prediction of the service life linked, among other, to hydro-mechanical behavior of concrete

and concrete joints is necessary to adopt a clear maintenance strategy based on economic and social risks. Indeed, if planned and anticipated, most of reparation operations could be performed with lighter building site installations and therefore substantially reducing the costs as well as limiting the inconvenience regarding mobility due to traffic closure. Reducing the costs of reparation operation is also expected to have a positive effect on the environment as the environmental impact of durable reparations in term of materials use or CO2 released is widely inferior to the reconstruction one.

This project is the first step of a whole research axis that could lead to the extension of the results to other material interfaces [...]. Indeed, in building or infrastructure construction for instance, interfaces between steel-concrete / concrete-soils / concrete-rocks / concrete-woods are frequently encountered and need to be accurately described. Another possible extension of this work would be to better consider the age of the material, in particular when it comes to rehabilitation: the “old” concrete material often exhibits a strong chemical degradation which leads to heavy reinforcement corrosion, and is expected to modify its behaviour. [...]

## Références

- [1] (Setra, 07) Sétra, MEMOAR, Guide for construction on bridges, septembre 2007.
- [2] (Briffaut, 2010) Briffaut M., Etude de la fissuration au jeune âge des structures massives en béton : influence de la vitesse de refroidissement, des reprises de bétonnage et des armatures, PhD thesis, ENS Cachan, in French.
- [3] (Bryne *et al.*, 2014) Bryne, L.E., Ansell, A., Holmgren, J. Laboratory testing of early age bond strength of shotcrete on hard rock, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 41 (2014), pp. 113-119.
- [4] (Briffaut *et al.*, 2016) Briffaut M., Benboudjema F., D'Aloia L., Effect of fibres on early age cracking of concrete tunnel lining. Part II : Numerical simulations, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 59, 221-229.
- [5] (Masson and Corbin, 16) Masson B., Corbin M., Vercors Mockup, First experimental results and synthesis of the Benchmark, Conference segment on Service Life of Cement-Based Materials and Structures, Lyngby, Denmark (2016).
- [6] (Habel, 04) Habel K. Stuctural behavior of elements combining ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPC) and reinforced concrete, EPFL PhD thesis.
- [7] (Brühwiler and Denarié, 08) Brühwiler E., Denarié E. Rehabilitation of concrete structures using Ultra-high performance fibre reinforced concrete. *The second international symposium on ultra high performance concrete*, Kassel, Germany, (2008).
- [8] (Tayeh *et al.*, 12) Tayeh B.A., Abu Bakar B.H., M.A. Megat Johari M.A., Voo Y. L., Mechanical and permeability properties of the interface between normal concrete substrate and ultra-high performance fiber concrete overlay, *Construction and Building Materials* 36 (2012), pp. 538–548.
- [9] (Momayez *et al.*, 05) Momayez A, Ehsani M.R., Ramezaniapour A.A., Rajaie H., Comparison of methods for evaluating bond strength between concrete substrate and repair materials, *Cement Concrete Res*, 35(4) (2005) pp. 748–57.
- [10] (Gambarova and Rosati, 96) Gambarova P., Rosati G., Bond and splitting in reinforced concrete: test results on bar pull-out, *Materials and Structures*, 29(179) (1996), pp. 267–276.
- [11] (Gambarova and Rosati, 96) P. Gambarova et G. Rosati Bond and splitting in bar pull-out : behavioural laws and concrete cover role, *Magazine of Concrete Research*, 49(179) (1997) pp. 99–110.
- [12] (Torre-Casanova *et al.*, 12) A. Torre-Casanova, L. Jason, L. Davenne, X. Pinelli Confinement effects on the steel-concrete bond strength and pull-out failure, *Engineering Fracture Mechanics*, 97 (2012), pp.92–104.
- [13] (Briffaut *et al.* 2015) Briffaut M., El Dandachy M., Dal Pont S., Dufour F. Permeability analysis of the interface between concrete and rebars during push in test, *Strategies for sustainable concrete structures proceeding*, Rio, Brazil, (2015).
- [14] (Rizkalla *et al.*, 84) Rizkalla, S.H., Lau, B.L., Simmonds, S.H., Air leakage characteristics in reinforced concrete, *J. Struct. Eng. (ASCE)* 110 (5) (1984), pp. 1149–1162.
- [15] (Nagano *et al.*, 89) Nagano, T., Kowada, A., Matumura, T., Inada, Y., Yajima, K., 1989. Experimental study of leakage through residual shear cracks on r:c walls. *Proceedings of the SMIRT-10*, pp. 139–144.
- [16] (Suzuki *et al.*, 92) Suzuki, T., Takiguchi, K., Hotta, H., Leakage of gas through concrete cracks, *Nuclear Engineering and Design* 133 (1992), pp. 121–130.
- [17] (Greiner and Ramm, 95) Greiner, U., Ramm, W., Air leakage characteristics in cracked concrete. *Nuclear Engineering and Design*, 156 (1995), pp. 167–172.
- [18] (Boussa *et al.*, 01) Boussa, H., Tognazzi-Lawrence, C., La Borderie, C., A model for computation of leakage through damaged concrete structures. *Cement Concrete Comp.* 23 (2001) ,pp. 279–287.
- [19] (Riva *et al.*, 99) Riva, P., Brusa, L., Contri, P., Imperato, L., Prediction of air and steam leak ratethrough cracked reinforced concrete panels, *Nuclear Engineering and Design* 192 (1999), pp. 13–30.
- [20] (Gelain and Vendel, 08) Gelain, T., Vendel, J., Research works on contamination transfers through cracked concrete walls, *Nuclear Engineering and Design*, 238 (2008), pp. 1159–1165.
- [21] (Bishnoia and Vedula, 13) Bishnoia L.R., Vedula R.P., Prediction of air leakage and aerosol transport through concrete cracks with a fractal based crack morphology model, *Nuclear Engineering and Design* 265 (2013) pp. 393–401.

- 
- [22] (Jourdain *et al.*, 14) Jourdain X, Colliat J-B, De Sa C, Benboudjema F, Gatuingt F. Upscaling permeability for fractured concrete: meso-macro numerical approach coupled to strong discontinuities, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 38(5) (2014) pp. 536-50.
- [23] (Rastiello *et al.*, 14) Rastiello G, Boulay C, Dal Pont S, Tailhan JL, Rossi P. Real-time water permeability evolution of a localized crack in concrete under loading, *Cement and Concrete Research* (56) (2014) pp. 20-28.
- [24] (Rastiello *et al.*, 15) Rastiello G, Tailhan JL, Rossi P, Dal Pont S. Macroscopic probabilistic cracking approach for the numerical modelling of fluid leakage in concrete, *Annals of Solid and Structural Mechanics*, 7(1) (2015) pp.1-16.
- [25] (Matallah and Laborerie, 2016) 3D Numerical modeling of the crack-permeability interaction in fractured concrete, 9th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures (Framcos 9), Berkley, USA (2016).
- [26] (Rastiello *et al.*, 16) Rastiello G., Desmettre C., Tailhan J.L., Rossi P., Charron J.P., Dal Pont S., Modeling of fluid leakage through multi-cracked RC structural elements using a numerical probabilistic cracking approach, *Materials and Structures* 49 (2016), pp.3095–3108.
- [27] (Dandachy *et al.*, 16) Ezzedine El Dandachy M, Briffaut M, Dufour F, Dal Pont S. An original semi discrete approach to assess gas conductivity of concrete structures, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2016.
- [28] (Zhou *et al.*, 08) Zhou J, Ye G, Schlangen E, van Breugel K Modelling of stresses and strains in bonded concrete overlays subjected to differential volume changes, *Theor. Appl. Fract. Mec.* 49 (2008), pp.199–205.
- [29] (Tang *et al.*, 16) Tang S. B. , Wang S. Y., Ma T. H., Tang C. A., Bao C. Y., Huang X, Zhang H., Numerical study of shrinkage cracking in concrete and concrete repair systems, *Int J Fract* 199 (2016) pp. 229–244.
- [30] (Herrmann *et al.*, 09) Herrmann N., Gerlach L., Müller H.S., Le Pape Y., Bento C., Niklasch C. and Kiefer D. PACE-1450 - Experimental investigation of the crack behaviour of prestressed concrete containment walls considering the prestressing loss due to aging, 20th Int. Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 20) Espoo, Finland, August 9-14, SMiRT 20-Division 1, Paper 1671, 2009.