

**Collège des Sciences et Technologies pour l'Energie et l'Environnement -
STEE**

Campus de la Côte Basque

Licence Physique - Chimie

Mise au point d'essais feu sur béton

LAGRABE Oriane

Stage effectué du 03 Avril 2018 au 01 Juin 2018 au

Laboratoire SIAME, Allée du Parc Montaury, 64600 Anglet

sous la direction scientifique de Mme Hélène Carré



"Le présent rapport constitue un exercice pédagogique qui ne peut en aucun cas engager la responsabilité de l'Entreprise ou du Laboratoire d'accueil"

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de mon stage et qui m'ont aidé lors de la rédaction de ce rapport.

Tout d'abord, j'adresse mes remerciements à mon professeur, Madame NIQUET qui m'a beaucoup aidé dans ma recherche de stage et m'a permis de postuler dans cette entreprise.

Je tiens à remercier vivement mon maître de stage, Madame CARRE, maître de conférence au sein du SIAME, pour son accueil, le temps passé ensemble et le partage de son expertise au quotidien. Grâce à sa confiance j'ai pu m'accomplir totalement dans mes missions. Elle fut d'une aide précieuse dans les moments les plus délicats.

Je remercie également toute l'équipe du SIAME qui m'a bien accueilli et mis en confiance pour ce stage.

Enfin, je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont conseillée et relue lors de la rédaction de ce rapport de stage : ma famille et mes camarades de promotion.

Sommaire

Introduction	1
I. Présentation du laboratoire	2
II. Contexte de l'étude	4
III. Etude bibliographique	6
III.1 Généralités sur le béton et ses constituants	6
III.1.1 L'eau	6
III.1.2 Le ciment	6
III.1.3 La porosité	7
III.1.4 Les granulats	8
III.1.5 Les adjuvants et les additifs	8
III.2 Impact de la température sur le béton	9
III.2.1 Transformations physico-chimiques des bétons sous l'effet d'un chauffage	9
III.2.2 L'écaillage, une des instabilités thermiques du béton	10
IV. Préparation des échantillons pour des essais à haute température	13
IV.1 Objectif de l'étude	13
IV.2 Protocoles expérimentaux	13
IV.2.1 Protocole expérimental de carottage	13
IV.2.2 Protocole expérimental de sciage	15
IV.2.3 Protocole expérimental de préparation des échantillons	16
IV.2.4 Protocole expérimental de chauffage des échantillons	19
IV.3 Résultats expérimentaux	22
V. Amélioration du fonctionnement du petit four à gaz pour essai feu ISO	25
V.1 Objectif de l'étude	25
V.2 Régulation du bain thermostatique	25
V.2.1 Présentation du dispositif expérimental	25
V.2.2 Les thermocouples	26
V.2.3 Validation du fonctionnement du bain thermostatique	27
V.3 Régulation du four	28
V.4 Résultats expérimentaux	29
Conclusion	30
Bibliographie	31
Annexes	32

Introduction

L'étude du comportement sous incendie des bétons a particulièrement pris son essor depuis des incendies répétés de tunnels comme celui sous la Manche ou celui du Mont-Blanc. La problématique de résistance au feu est essentielle puisque les éclatements qui peuvent accompagner la diminution de résistance du matériau sont de nature à fragiliser fortement les structures. Depuis plusieurs décennies, le domaine de la résistance au feu des bétons ordinaires et à hautes performances a été exploré tant expérimentalement que théoriquement.

Dans le cadre de ma licence de physique chimie à l'Université de Pau et des Pays de l'Adour, j'ai souhaité réaliser mon stage dans une entreprise répondant à ces enjeux du futur en matière de sécurité incendie tout en me formant au métier de chercheur que j'ai découvert et que ma formation propose comme débouché. Les missions de mise en place de protocoles et d'essais feu sur le béton m'ont particulièrement attiré car je souhaitais savoir si ce type de métier pouvait m'intéresser puisque je m'oriente dans ma formation et professionnellement vers la physico-chimie des matériaux.

Aussi, j'ai voulu intégrer les équipes du SIAME pour pouvoir découvrir leurs méthodes et principes industriels reconnus sur le marché. Nous verrons ainsi au travers de ce rapport la problématique actuelle du secteur : comment améliorer les dispositifs expérimentaux déjà en place afin de réaliser des essais à haute température sur du béton.

Dans un premier temps, je décrirai l'entreprise et son secteur en insistant sur ses particularités. Ensuite, le contexte général de l'étude et des éléments bibliographiques seront détaillés afin de bien comprendre le déroulé du stage. Puis je présenterai mes missions lors de ce stage avant de dresser un bilan de celui-ci.

I. Présentation du laboratoire

Le laboratoire des Sciences pour l'Ingénieur Appliquées à la Mécanique et au Génie Électrique (SIAME) est né en 2009 de la fusion des unités de recherche de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour suivantes :

- Le Laboratoire de Génie Électrique (LGE)
- Le Laboratoire de Sciences Appliquées au Génie Civil et Côtier (LaSAGeC)
- Le Laboratoire de Thermique, Énergétique et Procédés (LATEP).



Figure 1. Logo du SIAME

Le SIAME est membre de la fédération de recherche CNRS IPRA (Institut Pluridisciplinaire de Recherche Appliquée) et une partie de ses effectifs est également membre de la fédération MIRA (Milieux et Ressources Aquatiques).

En 2018, l'effectifs du Laboratoire est de :

- 27 Enseignants / Chercheurs
- 2 Ingénieurs
- 2 Secrétaires
- 23 Doctorants
- 5 Post-doctorants

De plus, le laboratoire possède des liens avec cinq départements d'enseignement :

- L'ISA-BTP (École d'ingénieurs en génie civil)
- Le département Génie Thermique et Énergie de l'IUT des Pays de l'Adour
- L'UFR sciences et techniques de Pau
- Le département Génie Industriel et Maintenance de l'IUT de Bayonne
- L'ENSGTI (École d'ingénieurs en procédés et énergétique) de Pau

Le laboratoire SIAME, dirigé par M. La BORDERIE, est constitué de deux équipes, elles-mêmes divisées en plusieurs axes de recherche, installées à cheval sur le campus d'Anglet et le campus de Pau :

- L'équipe « génie électrique », dirigée par M. PECASTAING, est composée de onze enseignants chercheurs et comporte deux axes de recherche :
 - L'axe Fortes Puissances Pulsées (FPP) investi dans les domaines tels que les micro-ondes impulsionnelles de forte puissance, les décharges électriques dans l'eau, les décharges atmosphériques, etc...
 - L'axe Milieux Diélectriques et Modélisations qui concentre entre autres ses recherches sur les plasmas de décharges électriques à la pression atmosphérique.

- L'équipe « mécanique », dirigée par M. ABADIE, est composée de 18 enseignants chercheurs et comporte quatre axes de recherche :
 - L'axe Interaction Vagues Structures (IVS) travaillant sur la modélisation de l'interaction vague/sol/structure.
 - L'axe Modélisation Aérodynamique et Transferts (MAT) travaillant sur la modélisation et la simulation numérique des écoulements et les transferts de chaleur ou de matière.
 - L'axe Transport Multiphasique (TM) spécialisé dans l'étude des écoulements complexes.
 - L'axe Géomatériaux et Structures du Génie Civil (GSGC) travaillant sur les comportements thermo-hygro-mécaniques des géomatériaux (bétons, terre crue, roches et sols).

C'est dans ce dernier axe que s'inscrivent les travaux sur la tenue et la durabilité des bétons soumis à de hautes températures. On trouvera également en annexe un organigramme détaillé de l'entreprise.

II. Contexte de l'étude

A l'heure actuelle, le béton est le deuxième matériau le plus utilisé dans le monde après l'eau. Il est présent dans deux tiers des habitations et dans de nombreux ouvrages de génie civil.

De nos jours, le comportement du béton sous sollicitations dynamiques sévères telles que les impacts, explosions ou ondes de chocs, est particulièrement méconnu. De nombreux incidents ont eu lieu au cours de ces dernières années dans des lieux publics tels que les parking ou les tunnels.

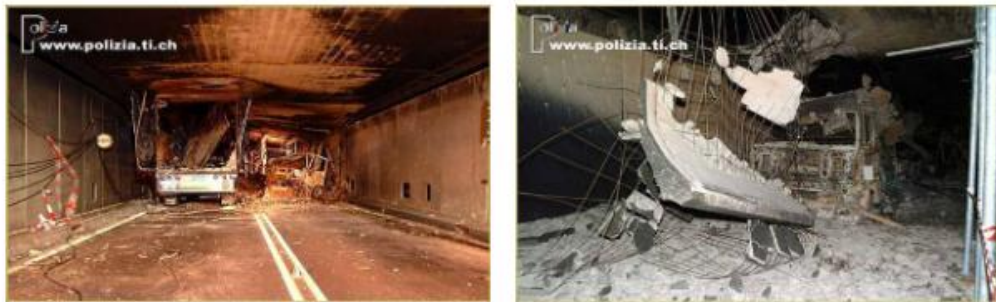


Figure 2. Photos du tunnel Saint Gotthard suite à l'incendie de 2001. A droite, effondrement du faux plafond en béton du tunnel [Mindeguia, 2009]

Les structures en béton peuvent également être soumises au risque d'une augmentation très importante de leur température dans des conteneurs de stockage des déchets radioactifs.

Dans ce contexte, en cas d'accident avec échauffement externe très important ou en cas d'incendie, ces conteneurs doivent rester scellés afin que les radionucléides ne se diffusent pas dans l'environnement immédiat. La résistance de leur structure doit donc être suffisante pour éviter toute catastrophe.

Afin de remédier à ce problème, la convention **UCOMP** a été mise en place. UCOMP signifie Ultra-fluid cementitious composite for the storage of radioactive waste subjected to fire risk.

Ce projet a donc pour objectif la conception des matériaux cimentaires ultra-fluides renforcés de fibres pour la fabrication de conteneurs de déchets exposés à un risque d'incendie. Plus généralement, ces solutions issues du projet UCOMP devraient permettre une amélioration globale de la sécurité incendie des structures en béton.

Cette convention a été faite entre :

- L'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA)

Et les partenaires suivants :

	Partenaire	Acronyme	Qualité
1	Université de Pau et des Pays de l'Adour	UPPA	<i>Coordinateur de Projet</i>
2	Centre d'Études et de Recherches de l'Industrie du Béton	CERIB	<i>Bénéficiaire</i>
3	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment	CSTB	<i>Bénéficiaire</i>
4	Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux	IFSTTAR	<i>Bénéficiaire</i>

Tableau 1. Les partenaires de la convention UCOMP

- **L'IFSTTAR** est un contributeur important à la recherche sur la rhéologie du béton frais contenant des fibres synthétiques.
- **L'UPPA**, plus précisément ici le laboratoire SIAME, a depuis de nombreuses années développé des recherches sur le comportement du béton à haute température comme vu précédemment.
- Le **CSTB** et le **CERIB** ont une grande expérience dans le comportement au feu du béton dans les bâtiments et les tunnels. Grâce à leurs installations d'essai à grande échelle, ils sont en mesure de réaliser des essais à échelle réelle. Le CSTB a également une grande expérience dans le domaine de la réglementation. Le CERIB, grâce à son lien privilégié avec l'industrie des éléments préfabriqués français, a une parfaite connaissance des matériaux et des techniques de mise en œuvre.

L'équipe du projet UCOMP a la particularité de combiner les compétences de recherche sur la rhéologie et le comportement du béton à haute température ce qui, à notre connaissance, n'a pas encore été fait dans le monde de la recherche.

Le projet a débuté le 1^{er} Février 2017 et la durée prévisionnelle des travaux est de 42 mois. Le coordinateur de projet devra fournir des rapports pour tenir compte à l'ANDRA de l'avancement du projet. Un synthèse de 2 pages maximum sera rédigée en français et en anglais. Le projet aura un coût approximatif d'1 million d'euros.

III. Etude bibliographique

III.1 Généralités sur le béton et ses constituants

Le béton est un matériau multiphasique complexe constitué essentiellement d'une pâte de ciment, de granulats et d'eau ainsi qu'éventuellement d'additions minérales et d'adjuvants. On se propose ici de présenter succinctement chacun de ces composants.

III.1.1 L'eau

L'eau est introduite afin de déclencher les réactions d'hydratation du ciment et de permettre une bonne maniabilité du béton frais. Elle se trouve sous plusieurs formes dans la pâte de ciment durcie :

- L'eau chimiquement liée : cette eau s'est combinée avec d'autres espèces durant l'hydratation des grains de ciment pour former les hydrates.
- L'eau adsorbée : cette forme d'eau est liée à la surface des pores solides sous l'action de forces intermoléculaires de Van Der Waals et de forces électrostatiques, on parle alors d'adsorption. Les forces d'adsorption décroissent à mesure que l'on s'éloigne du solide.
- L'eau libre (ou capillaire) : il s'agit de la forme condensée d'eau qui remplit le volume poreux dans les zones qui ne sont pas sous l'influence des forces d'adsorption. Cette forme d'eau peut être en équilibre avec la phase gazeuse par l'intermédiaire de surfaces planes ou de ménisques.

En plus de cette classification, une distinction est faite entre :

- L'eau "évaporable" : essentiellement l'eau libre et l'eau adsorbée la moins liée,
- L'eau "non évaporable" : l'eau adsorbée la plus liée (et en particulier l'eau inter-feuillet) et l'eau chimiquement liée. Le départ de cette eau nécessite un séchage à haute température.

La présence de l'eau, sous toutes ses différentes formes, détermine une grande partie des propriétés du béton. A température ambiante, la teneur en eau du béton ainsi que le mouvement de l'eau sont par exemple responsables de différentes formes de retrait. L'influence de l'eau sur les propriétés mécaniques instantanées et différées (fluage) est également très importante [Mindeguia, 2009].

III.1.2 Le ciment

La pâte de ciment permet de donner une cohésion au béton en jouant le rôle de liant hydraulique.

Il existe différents types de ciments qui seront listés en annexe. Le premier à avoir été utilisé dans le génie civil est le ciment "Portland".

Ce ciment est composé :

- De clinker : obtenu dans les fours à ciment après la cuisson à haute température (1450 °C) d'un mélange finement broyé de calcaire et d'argile
- De gypse ($\text{CaSO}_4, 2 \text{H}_2\text{O}$) : ajouté au ciment afin d'éviter le phénomène de "fausse prise" grâce à la formation d'un écran momentané de cristaux d'ettringite :
L'ettringite correspond à une réaction sulfatique interne qui affecte l'ensemble du béton. Survenant dans des configurations spécifiques de paramètres multiples, encore mal connus, ce phénomène provoque un gonflement interne du béton, entraînant une fissuration multidirectionnelle du matériau.
- D'ajouts éventuels : afin de réduire les consommations d'énergie imputées à la fabrication du ciment, certains produits sont ajoutés afin de remplacer une partie du ciment.

Les principaux constituants d'un ciment ordinaire sont rassemblés dans le tableau suivant :

Désignation	Formule chimique exacte	Formule chimique simplifiée	Proportion dans un ciment ordinaire
silicate tricalcique (ou alite)	$3 \text{CaO}, \text{SiO}_2$	C_3S	60 – 65 %
silicate bicalcique (ou bélite)	$2 \text{CaO}, \text{SiO}_2$	C_2S	20 – 25 %
aluminate tricalcique (ou céliste)	$3 \text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	8 – 12 %
alumino-ferrite tétracalcique	$4 \text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	8 – 10 %

Tableau 2. Principaux constituants d'un ciment ordinaire

Le mélange d'eau et de ciment entraîne des réactions d'hydratation complexes dès la mise en contact des deux espèces. Les grains de ciment initialement anhydres causent la précipitation d'hydrates qui vont progressivement s'organiser en structure résistante. Les principaux hydrates formés sont :

- Le silicate de calcium hydraté ou gel CSH
- L'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ou Portlandite

III.1.3 La porosité

Le béton est un matériau poreux. Cette porosité est complexe puisqu'elle s'étale sur différentes échelles et résulte de différents phénomènes. Mais le caractère poreux du béton est très important puisque la résistance de celui-ci est liée à sa porosité :

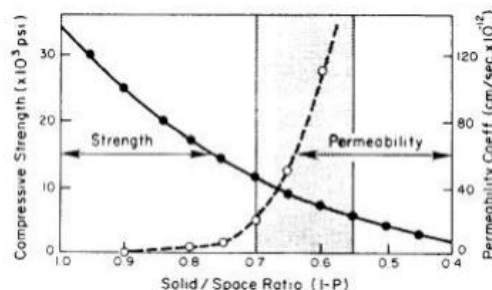


Figure 3. Relation entre résistance, perméabilité et porosité du béton [METHA, 1986]

De manière générale, on voit que plus le béton est poreux, plus sa perméabilité est grande et plus sa résistance à la compression diminue.

La porosité capillaire est déterminante dans le béton et c'est souvent elle la plus présente. Elle provient de l'eau libre n'ayant pas réagi avec le ciment et du volume qui n'a pas été rempli par les produits d'hydratation.

Ces pores sont interconnectés et sont donc responsables en majeure partie de la perméabilité de la pâte de ciment. Les capillaires peuvent être plus ou moins remplis d'eau selon les conditions de conservations. En conservant le béton dans l'eau, on peut estimer que ces pores sont saturés. Cette porosité est très dépendante du rapport E/C (Eau/Ciment) car il gouverne l'espacement initial des grains de ciment [Gagne et al, 1993].

III.1.4 Les granulats

Les granulats représentent l'essentiel du volume du béton (3/4 environ). Dans le béton, l'idéal est d'avoir une granulométrie assez continue entre le ciment et le plus gros granulat afin d'optimiser la compacité du squelette granulaire.

Cette granulométrie va également jouer un rôle sur la maniabilité du béton. Il est aisé d'imaginer que la qualité et la résistance des granulats influencent la résistance du béton.

III.1.5 Les adjuvants et les additifs

Les adjuvants sont des produits chimiques qui, introduits dans l'eau de gâchage souvent en très petites quantités, permettent d'améliorer certaines propriétés du béton. Parmi les plus utilisés, on peut citer les plastifiants et superplastifiants, les agents entraîneurs d'airs, les retardateurs de prises, les accélérateurs de prises, etc...

Pour augmenter la compacité du squelette granulaire ou pour obtenir certaines propriétés physico-chimiques, on peut remplacer une partie du ciment par des additions minérales. Parmi les plus couramment utilisées, on peut citer les fumées de silice, les cendres volantes et les fillers calcaires.

III.2 Impact de la température sur le béton

III.2.1 Transformations physico-chimiques des bétons sous l'effet d'un chauffage

Lors d'un incendie, le béton peut atteindre des températures très élevées. Ces montées en température provoquent de nombreuses modifications des propriétés du béton : augmentation de la porosité, diminution de la résistance en compression, diminution de l'adhérence entre le béton et les armatures, instabilité thermique du béton, diminution de la durabilité, etc. [Xing, 2011]

Cette augmentation de température entraîne également d'importants changements physico-chimiques et minéralogiques au sein de la matrice cimentaire du béton :

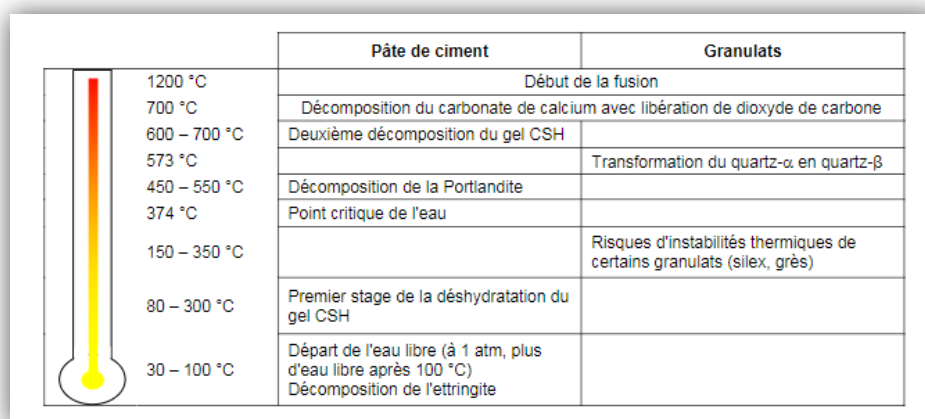


Figure 4. Tableau des principales transformations du béton lors d'un chauffage (photo : [Mindeguia, 2009])

De nombreuses techniques expérimentales permettent de déterminer les différentes transformations physico-chimiques qui prennent place au sein du béton lors d'une augmentation de température. La mesure de perte de masse en fonction de la température sur des échantillons de petite taille est une des méthodes nous permettant d'évaluer les différents changements de phase au sein du béton. Les mesures effectuées sont généralement conduites sous des vitesses de chauffage relativement lentes afin de placer le matériau dans un état quasi-stationnaire.

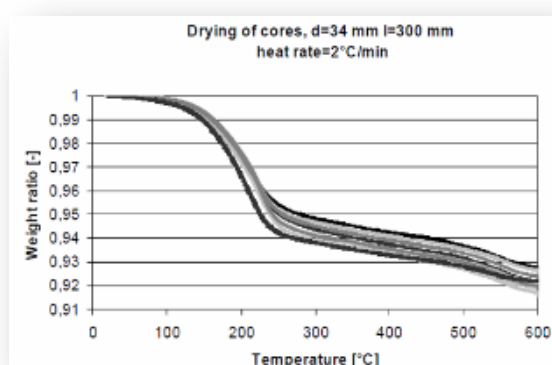


Figure 5. Perte de masse de 9 formulations différentes de béton [Jansson et Bostrom 2007]

La Figure 5 présente la mesure de perte de masse d'éprouvettes cylindriques de différents bétons sous un chauffage lent (2 °C/min) [Jansson et Bostrom, 2007].

La perte de masse, qui correspond au départ de l'eau du béton, est en grande partie située entre 100°C et 250°C. Selon la figure 3, cela peut correspondre au séchage du matériau (départ de l'eau évaporable) ainsi qu'à la déshydratation des CSH (départ d'une partie de l'eau liée). Une légère accélération de la perte de masse est observée aux alentours de 550 °C, ce qui peut correspondre à la déshydratation de la Portlandite. Dans la partie expérimentale, nous mettrons en place des protocoles visant à réduire cette perte de masse liée au départ de l'eau.

III.2.2 L'écaillage, une des instabilités thermiques du béton

Les recherches dans le domaine du comportement au feu du béton ont montré que l'écaillage est une cause majeure de perte de capacité de la structure sollicitée par des hautes températures.

L' écaillage est un phénomène continu d'expulsion de petits copeaux de béton du parement exposé au feu. Tant que dure l'incendie, le phénomène se poursuit et l'épaisseur du béton diminue de façon proportionnelle au temps du sinistre.



Figure 6. Photo de l'éclatement d'un tablier de pont en Suède suite à l'incendie d'un camion citerne (à gauche) et éclatement d'un poteau de la tour Windsor à Madrid suite à un incendie de 2005 (à droite) (photo : [Bostrom et Lindqvist, 2006])

L'apparition d'écaillage par le feu est influencée par de nombreux paramètres : la rapidité du chauffage, la compacité du béton, la teneur en eau du béton, la nature des granulats ou encore l'effet de chargement compressif. C'est un sujet sur lequel il n'y a pas beaucoup de données collectées. Il a un rôle central dans le travail de recherche actuel.

Des études expérimentales pour étudier l'interaction entre la pression des pores et les contraintes thermomécaniques lorsque l'écaillage se déclenche ont été mises en place au SIAME. C'est donc sur ces théories que vont se baser les études expérimentales effectuées dans ce rapport.

Cette partie fait référence aux essais "matériaux" des bétons. Ces essais doivent à la fois nous permettre de caractériser les différents bétons de l'étude afin de nous aider dans l'analyse des résultats des essais "structure" mais peuvent également servir de données d'entrée aux modèles de simulation.

L'évolution des principales caractéristiques des bétons avec la température sera donc étudiée. La gamme de température retenue pour les essais s'étend le plus souvent de la température ambiante à 800°C. Cette amplitude couvre les températures pour lesquelles les instabilités thermiques des bétons s'observent. Par ailleurs, cela correspond aussi aux capacités des moyens expérimentaux utilisés.

Les essais expérimentaux mettant en jeu la phénomène d'écaillage ont été effectués au SIAME de la manière suivante [Miah, 2015] :

Un béton ordinaire est étudié. Le comportement du béton est observé au cours des essais : bruits, fissurations, suintements d'eau. Après les essais, une cartographie des surfaces chauffées est réalisée afin de quantifier l'écaillage.

Un petit four à gaz a été crée pour réaliser ce test. Ce four à une ouverture de 200*200 mm. Il est équipé de 3 thermocouples gainées de type K placées respectivement à 4,10 et 16 cm du bas de l'ouverture du four. Le four est fait de métal extensif et de laine céramique à l'extérieur. La forme du pavillon influence la distribution de température aussi bien dans le four que dans le béton.

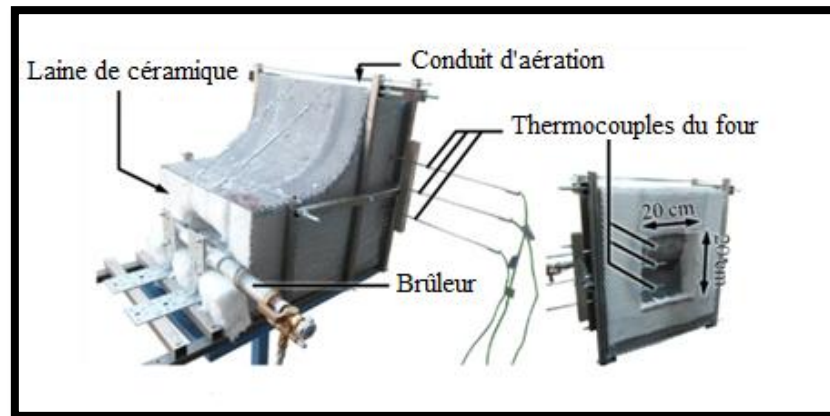


Figure 7. Four à gaz mobile (vue de l'arrière à gauche et vue de l'avant à droite)

Pour tester l'homogénéité du chauffage, un cube de béton a été placé dans le four avec 5 thermocouples. Les thermocouples ont été répartis sur la surface chauffée. Ce test montre les résultats suivants :

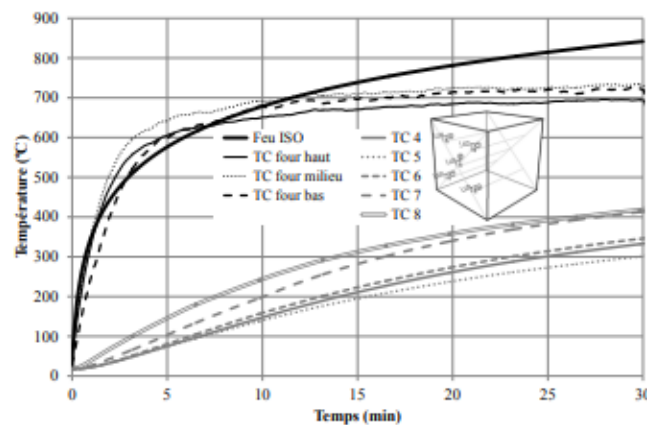


Figure 8. Evolution de la température de l'éprouvette de mise au point en fonction du temps

La figure 8 donne également l'évolution de la température des trois thermocouples placés à l'intérieur du four ainsi que la courbe correspondant à un feu ISO 834-1. La courbe ISO 834-1 correspond à une méthode d'essai permettant de déterminer la résistance au feu de divers éléments de construction quand ils sont soumis à des conditions normalisées d'exposition au feu.

On peut noter que le chauffage est très semblable à un feu ISO 834-1 durant les deux premières minutes, un peu plus sévère de la troisième à la dixième minute puis un peu moins sévère après la dixième minute. Le chauffage est arrêté au bout de trente minutes. Au vu des mesures réalisées avec les trois thermocouples placés dans le four, à proximité de la surface de béton chauffée, l'homogénéité de la température dans le four apparaît satisfaisante. Les cinq thermocouples placés dans le béton sont théoriquement positionnés à 10 mm de la surface chauffée.

Après refroidissement de l'éprouvette, la position réelle des thermocouples (TC) est mesurée en réalisant des trous dans l'éprouvette. Les mesures réalisées donnent : 13 mm pour le TC4, 13 mm pour le TC5, 10 mm pour le TC6, 11 mm pour le TC7 et 8 mm pour le TC8. Le positionnement réel des thermocouples est cohérent avec les mesures de températures réalisées. En effet, le TC8 est le plus proche de la surface chauffée et donne les températures les plus élevées. TC4 et TC5 sont les plus éloignés de la surface chauffée et donnent des températures très proches et plus faibles que le TC8. Ces différentes mesures montrent une homogénéité de la température satisfaisante dans le béton.

Le dispositif d'essai présenté permet de réaliser des essais feu sur de petites éprouvettes. Ce dispositif peut être installé alors que l'éprouvette est chargée par une presse hydraulique. L'effet du chargement mécanique sur le risque d'écaillage peut ainsi être évalué.

Les essais de validation ont permis de montrer que la température est homogène dans le four. Cela induit une température uniforme dans l'éprouvette. L'écart de température pour des points se situant à la même distance de la surface chauffée est évalué à quelques dizaines de degrés.

Ces résultats sont jugés satisfaisants. Les premiers essais sur un béton ordinaire présentant une teneur en eau initiale élevée (4,4 % à proximité de la surface et 5,5 % à cœur) ont montré de l'écaillage entre la 10ème et la 22ème minute. De nombreuses perspectives existent pour l'utilisation de ce four à gaz. Lors de ce stage, le but va être d'améliorer le chauffage du four afin de se rapprocher le plus précisément possible de la courbe du feu ISO 834-1 après la 10ème minute.

IV. Préparation des échantillons pour des essais à haute température

IV.1 Objectif de l'étude

L'objectif de ce travail est d'effectuer la préparation d'échantillons de béton afin de mettre au point un protocole permettant d'assurer des transferts d'humidité contrôlés. Comme on ne peut pas vérifier le transfert d'eau uniaxial, on fera le choix d'encapsuler les échantillons, afin d'éviter tout transfert d'eau. Les pertes de masse de nos échantillons seront alors mesurées afin de déterminer le meilleur moyen d'étancher les échantillons.

IV.2 Protocoles expérimentaux

IV.2.1 Protocole expérimental de carottage

Afin de préparer les échantillons nécessaires à nos expériences, on procède au carottage. On choisit d'en prélever 30 :

- 18 échantillons prélevés sur des cylindres de 21 cm de longueur : 6 cylindres, avec 3 échantillons prélevés par cylindre.
- 12 échantillons prélevés sur des cylindres de 31,7 cm de longueur : 2 cylindres, avec 6 échantillons prélevés par cylindre.

Le diamètre extérieur de la carotteuse est de 5,1 cm. Son diamètre intérieur, qui sera le diamètre de nos échantillons, est de 4,2 cm.

On obtient le montage suivant :

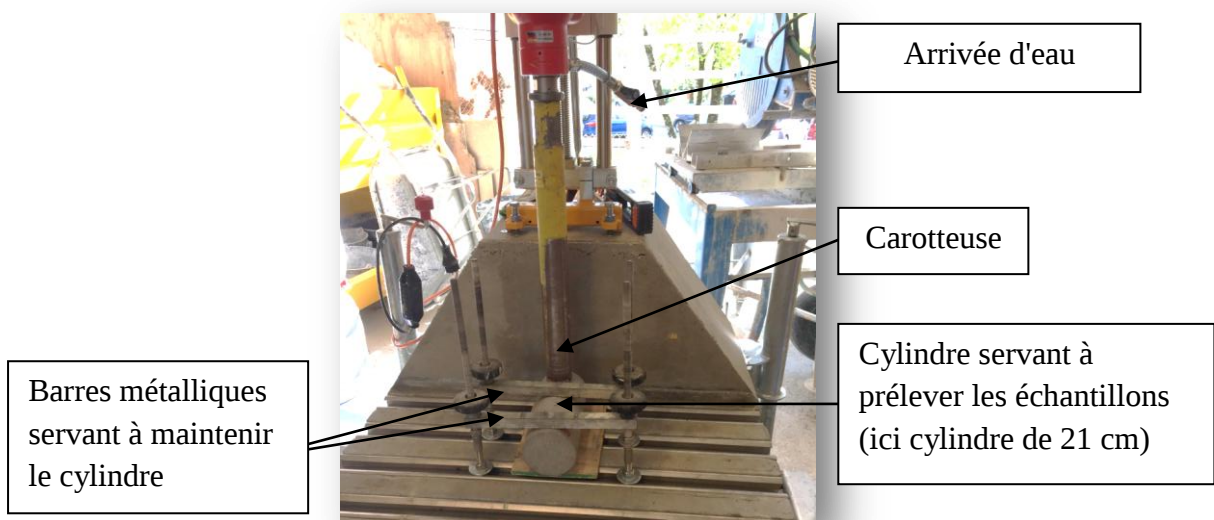


Figure 9. Montage expérimental de la carotteuse

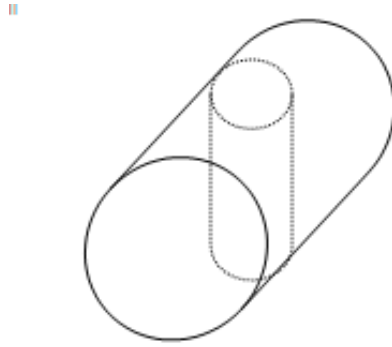


Figure 10. Schéma représentant la découpe d'échantillon effectuée à l'aide de la carotteuse

Protocole expérimental de carottage :

- Placer les échantillons sous la carotteuse en les fixant à l'aide de barres métalliques
- Brancher l'arrivée d'eau à l'endroit indiqué sur le schéma
- Ouvrir la vanne d'eau de manière à refroidir la carotteuse lors du forage. Régler la vitesse sur 1,2 ou 3 : 1 étant la vitesse la plus lente, 3 la plus rapide. On choisit ici de rester sur 2. Le choix de la vitesse va s'étudier en fonction de la taille du carottier et de la taille de l'échantillon. Ainsi plus on aura un diamètre petit pour notre carottier, plus il faudra avoir une vitesse rapide pour conserver une bonne homogénéité de découpe.
- Allumer la carotteuse. Tourner la manivelle de manière régulière afin d'éviter toute irrégularité sur les échantillons
- Une fois le forage terminé, arrêter la carotteuse puis numéroté chaque échantillon (bien noter la position initiale de chaque échantillon prélevé)

IV.2.2 Protocole expérimental de sciage

Une fois nos 30 échantillons prélevés, on procède au sciage. On va pour cela prendre nos échantillons, et les découper de telle sorte à ce qu'il n'y ait aucune d'irrégularité de chaque côté. On décide que leur longueur doit être de 50mm.

On se retrouve donc avec un total de 41 échantillons après sciage, découpés en l'espace d'une journée.

Protocole expérimental de sciage:

- Placer l'échantillon à découper dans la machine, bien aligné dans l'axe par rapport à la scie
- Rentrer les différents réglages pour la découpe. On choisit les réglage suivants :
 - Puissance : 2800 U/min
 - Vitesse de découpage : 1,5 mm/s
 - Distance de découpe : 76,5 mm/s
- Appuyer 2 fois sur le bouton de démarrage.
- Vérifier que l'eau est branchée afin d'éviter la surchauffe



Figure 11. Scie utilisée pour obtenir les échantillons finaux

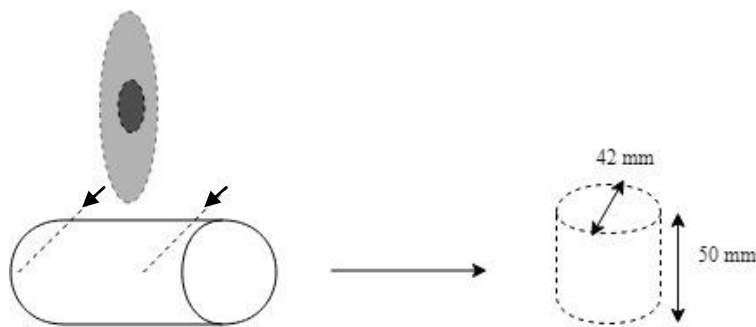


Figure 12. Schéma de découpe des échantillons (à gauche) et obtention des échantillons découpés (à droite)

IV.2.3 Protocole expérimental de préparation des échantillons

On cherche à préparer nos échantillons de manière à ce que lorsqu'on les chauffe à de hautes températures, il n'y ait aucune perte de masse, c'est à dire de manière à empêcher le départ de l'eau libre présente dans le béton.

On utilise pour cela des produits permettant d'isoler de la meilleure façon possible nos échantillons, tels que de la colle de la peinture ou encore du papier aluminium.

Afin de choisir les meilleurs matériaux possibles pouvant résister à de fortes températures, plusieurs recherches ont été effectuées, notamment pour le choix de la colle.

Ces recherches ont permis de trouver différents types de colle présentant de nombreuses caractéristiques intéressantes dans le cadre de nos essais feu, qui seront décrites ci-dessous :

- **Colles epoxy :**

La colle époxy, ou colle époxydique, est une colle de synthèse qui se trouve sous forme de produit bicomposant, constitué généralement d'un durcisseur et d'une résine que l'utilisateur mélange lui-même avant application. Il existe également une variante "monocomposant", plus rare : contrairement au modèle bicomposant qui autorise le durcissement à froid, la solidification de la version monocomposant exige une température de 120°C.

La colle époxy se caractérise par :

- Son extrême solidité
- Son étanchéité à l'eau, aux solvants, à l'huile
- Sa résistance aux vibrations, chocs et torsions
- La possibilité d'être limée et poncée

La colle époxy possède cependant quelques inconvénients. En effet, elle a une résistance au feu limitée qui n'excède généralement pas les 300°C, ce qui ne semble pas pouvoir suffire pour les essais que l'on souhaite réaliser.

Voici quelques exemples de colles epoxy :

Marque	Nom du produit	Description produit	Toxicité	Température max d'utilisation
Kohesi Bond	KB 1372-LO	Monocomposant. Pour l'électronique, le collage, l'étanchéité, le revêtement, l'optique, la chimie	Inconnue	+230°C
MasterBond	One part epoxy - EP17HT-LO (371)	Monocomposant. Pour le collage, l'étanchéité, le revêtement et l'encapsulation. Bonne isolation électrique et résistance	Non toxique	+340°C

Tableau 3. Exemples de colles epoxy

- **Colles au silicate de sodium :**

Le Silicate de Sodium est une substance chimique de formule Na_2SiO_3 , inodore et très soluble dans l'eau. Le silicate de sodium permet d'imprégner de nombreux corps : pierre, brique réfractaire et plâtre, pour les durcir et leur donner une tenue au feu. C'est un protecteur hydrofuge et ignifuge. Il est injecté avec des bétons pour stabiliser les sols.

Il existe des colles au silicate de sodium qui possèdent les propriétés suivantes :

- Elles résistent aux très hautes températures (plus de 800°C)
- Elles offrent une bonne barrière anti-humidité

Elles correspondent donc bien aux caractéristiques recherchées pour nos essais.

Voici différents exemples de colles composées de silicate de sodium :

Marque	Nom du produit	Description produit	Toxicité	Tmax d'utilisation
Weiss	COSMO DS 480.120	Encollage de matériaux absorbants : inoxydables dans le domaine de la protection-incendie.	Inconnue	+800°C
Kohesi Bond	KB-SS-MOD	Barrière contre l'humidité.	Non toxique	+370°C
Ruaud Industries	Athermafix	Contient argile et kaolin. S'applique à température ambiante.	Non toxique	+800°C

Tableau 4. Exemples de colles silicate de sodium

Les recherches effectuées afin de trouver les colles les plus efficaces pour étancher nos produits ont permis de sélectionner différents modèles qui semblent posséder les propriétés recherchées. Une première expérience est effectuée avec les produits suivants :

Mastic réfractaire pyrofeu	Colle réfractaire pyrofeu	Peinture
		

Tableau 5. Produits utilisés pour travailler sur l'étanchéité des échantillons

Le mastic et la colle possèdent les propriétés suivantes :

Ils sont composés exclusivement de matières minérales inertes. Il n'y a pas d'évaporation de substance lors de la montée en température ; seule l'eau s'évapore menant au séchage complet du produit aux hautes températures. Il n'y a aucun composé organique dans ces produits. Concernant leur composition, ces produits contiennent :

- SiO_2
- Al_2O_3
- Fe_2O_3

De plus ces produits résistent à des températures allant jusqu'à 1200°C . Ils ont même obtenu le classement européen A1, pour leur comportement au feu, signifiant qu'ils sont incombustibles.

La peinture quand a elle doit permettre une résistance thermique jusqu'à 900°C . On se doute cependant qu'elle ne sera pas la barrière la plus efficace contre la perte d'eau, car elle ne fera que recouvrir le béton sans vraiment empêcher les transferts de masse.

On choisit également un papier aluminium très fin pour recouvrir nos échantillons.

On choisit d'effectuer un deuxième chauffage en utilisant cette fois-ci une colle au silicate de sodium, la colle Athermafix, décrite dans le tableau présentant différentes colles au silicate de sodium.

Lors de ces deuxième chauffage, on choisit un papier aluminium bien plus épais et résistant.

IV.2.4 Protocole expérimental de chauffage des échantillons

Les températures d'étude seront 200°C, 400°C et 600°C. On utilise le four suivant :



Figure 13. Photo du four utilisé pour le chauffage des échantillons

Afin d'optimiser le temps de chauffage et la reproductibilité, les échantillons ont été chauffés ensemble dans un four en suivant le programme suivant :

- Chauffage jusqu'à 200°C (rampe 120°C/h) puis palier à 200°C pendant 6 h puis refroidissement jusqu'à température ambiante.
- Chauffage jusqu'à 400°C (rampe 120°C/h) puis palier à 400°C pendant 6 h puis refroidissement jusqu'à température ambiante.
- Chauffage jusqu'à 600°C (rampe 120°C/h) puis palier à 600°C pendant 6 h puis refroidissement jusqu'à température ambiante.

L'utilisation de paliers durant le chauffage permet d'homogénéiser la température dans le béton. On laisse les échantillons refroidir dans le four avant de les peser.

Afin d'étudier le comportement du béton selon chacune de ses variables, on choisit dans un premier temps de préparer 12 échantillons de toutes tailles et de toutes formes, en utilisant ceux préparé précédemment et en prenant des morceaux restants après les différentes coupes, en adoptant les configurations suivantes :

- 2 échantillons mastic+alu : MA1, MA2
- 2 échantillons colle+alu : CA1, CA2
- 2 échantillons colle : C1, C2
- 2 échantillon mastic : M1, M2
- 2 échantillons tests "Nus" non recouverts : 7.1H, 6.3 B
- 2 échantillons peints : P4, P5

Nus	Colle	Mastic	Colle/mastic+alu	Peinture
				

Tableau 6. Tableau représentant les différentes catégories d'échantillons étanchés

Dans un deuxième temps, on effectue une autre expérience afin d'espérer obtenir de meilleurs résultats. On utilise pour cela 18 échantillons, tous de la même taille et de la même forme car on choisit de prendre ceux découpés lors du sciage. Leur numérotation est celle effectuée lors de la découpe et permet de les repérer au cours des chauffages :

- 2 échantillons colle athermafix avec 1 couche de colle : 2.1, 2.2
- 2 échantillons colle athermafix+alu avec 1 couche de colle : 1.1, 1.2
- 2 échantillons colle athermafix avec 3 couches de colle : 7.5, 7.6
- 2 échantillons colle athermafix+alu avec 3 couches de colle : 6.1, 6.2
- 2 échantillons mastic avec 1 couche de mastic : 3.1, 3.3
- 2 échantillons mastic+alu avec 1 couche de mastic : 4.1, 4.2
- 2 échantillons mastic avec 3 couches de mastic : 7.2, 7.3
- 2 échantillons mastic+alu avec 3 couches de mastic : 8.5, 8.6
- 2 échantillons nus : 8.1, 8.2

Voici l'aspect des échantillons avec la colle athermafix :



Figure 14. Echantillon recouvert à l'aide de la colle athermafix

On choisit également de déterminer la perte de masse de la colle et du mastic à eux seuls, puis on décide de prendre en compte cette dernière ainsi que le poids de l'aluminium qui est d'environ 1g pour chaque échantillon dans nos calculs de perte de masse. Ces résultats permettent d'observer que les pertes les plus importantes sont majoritairement liées à la perte de masse de la colle et du mastic, non à celle de l'eau présente dans le béton.

Température(°C)	Masse colle(g)	Perte de masse(%)	Masse mastic (g)	Perte de masse(%)
20	29	0	12,8	0
200	23,05	20.5	8,96	30
400	22,65	21,9	8,86	30,8
600	21,93	24,4	8,55	33,2

Tableau 7. Perte de masse colle et mastic en fonction de la température

Les pertes de masse (en %) dans les échantillons peinture et "nus" ont été déterminées à l'aide de la formule suivante :

$$\text{Perte de masse} = \frac{m_{\text{initiale}} - m_{\text{finale}}}{m_{\text{initiale}}} \times 100$$

On applique cependant une correction à la perte de masse pour les échantillons possédant de la colle, du mastic et de l'alu à l'aide de la formule suivante :

$$\text{Correction colle/mastic/alu} = \frac{m(\text{ini} + \text{protection}) - m(\text{finale}) - m(\text{alu}) - m(\text{colle, mastic}) \times \text{perte masse}(\text{colle, mastic})}{m(\text{ini})} \times 100$$

Avec :

$m(\text{ini})$ = masse initiale de l'échantillon quand il est non recouvert

$m(\text{ini} + \text{protection})$ = masse de l'échantillon une fois qu'il a été recouvert de colle, mastic ou alu

$m(\text{alu})$ = masse d'aluminium ajoutée

$m(\text{colle, mastic})$ = masse de la colle ou du mastic sur l'échantillon

perte masse (colle, mastic) = perte de masse de la colle ou du mastic (voir tableau 2)

$m(\text{finale})$ = masse finale de l'échantillon après chauffage

Un tableau détaillé des différentes valeurs obtenues permettant le calcul des pertes de masse sera fourni en annexe.

IV.3 Résultats expérimentaux

On obtient les résultats du 1^{er} chauffage sur les échantillons de béton sous la forme d'une courbe représentant la perte de masse en fonction de la température.

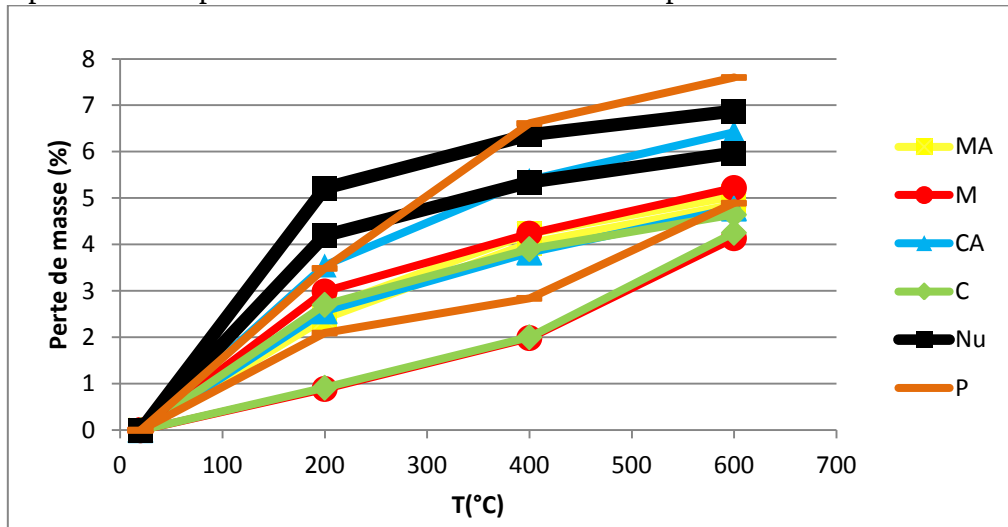


Figure 15. Courbes représentant la perte de masse des échantillons en fonction de la température

D'après ces résultats, on observe une perte de masse globale variant de 0,9% à 7,6% pour tous nos échantillons. Les échantillons nus présentent une perte de masse de l'ordre de 6 à 7%.

Ces courbes montrent une perte de masse importante pour l'un des échantillons colle+alu et pour un échantillon de peinture. En effet, ces 2 échantillons possèdent une perte de masse plus importante que les échantillons non recouverts., ce qui signifie qu'ils ne protègent pas le béton contre la perte de masse. On voit cependant que le reste des échantillons présente une perte de masse plus faible que celle des échantillons nus, permettant pour la plupart de réduire de moitié cette perte de masse.

On observe également une corrélation entre la masse de notre échantillon et la perte de masse, ce qui ne semble pas cohérent. On peut cependant expliquer ce phénomène par le fait que les petits échantillons sont des échantillons de surface et qu'ils sont donc plus secs que les échantillons plus lourds qui eux ont été prélevés au cœur du béton et qui possèdent donc plus d'humidité.

En analysant nos échantillons à l'aide d'une binoculaire, on peut également observer :

- A 200°C : Une formation de cloques sur les échantillons colle et une formation de fissures sur les échantillons mastic
- A 400°C : Une formation de cloques et de fissure sur les échantillons colle et une formation de fissures sur les échantillons mastic. On observe une décoloration globale des échantillons due à la perte d'eau et au séchage des revêtements
- A 600°C : Une forte décoloration des échantillons. Une formation de cloques et de fissures sur les échantillons colle, des fissures sur les échantillons mastic. On observe également des fissures importantes au niveau des échantillons colle+alu et mastic+alu



Figure 16. Echantillon colle cloqué (à gauche) et échantillon mastic fissuré (à droite) à 200°C



Figure 17. Echantillon colle cloqué et fissuré (à gauche) et échantillon mastic fissuré (à droite) à 600°C



Figure 18. Echantillon colle+alu (à gauche) et mastic+alu (à droite) fissurés à 600°C



Figure 19. Coloration échantillon test avant chauffage (à gauche) et après chauffage à 600°C (à droite)

D'après nos différents résultats, la colle ne permet pas d'étancher correctement le béton. Ses pertes de masses restent élevées et elle présente une formation de cloques et de fissures très importante.

Le mastic semble plus efficace que la colle car ce dernier ne cloque pas. Il présente néanmoins quelques fissures.

Le papier aluminium ne présente pas une efficacité particulière, il fissure et s'effrite à 600°C.

C'est pour cela que l'on choisit d'effectuer un second chauffage en conservant le mastic, en utilisant une colle au silicate de sodium et en renouvelant les essais avec un papier aluminium plus épais afin d'obtenir une meilleure étanchéité. Faute de temps, ce 2^{ème} chauffage n'a pas pu être réalisé. Seule la préparation d'échantillon a pu être effectuée.

V. Amélioration du fonctionnement du petit four à gaz pour essai feu ISO

V.1 Objectif de l'étude

On cherche à améliorer le fonctionnement du petit four à gaz vu dans la partie bibliographie afin d'obtenir une courbe de température plus proche de celle de l'ISO 834-1 à l'aide de la régulation du bain thermostatique.

V.2 Régulation du bain thermostatique

V.2.1 Présentation du dispositif expérimental

Nous allons mettre en place un bain thermostatique qui servira au maintien et au chauffage de l'eau autour de nos bouteilles de gaz et qui nous permettra ainsi de jouer sur la pression qui s'exercera au niveau des gaz afin d'améliorer le fonctionnement du four. On utilise pour cela une résistance chauffante afin d'amener le bain à la température souhaitée. On dispose également d'une pompe à eau permettant de bien mélanger l'eau. Afin de vérifier l'homogénéité de température dans le bain, nous allons utiliser des thermocouples que l'on placera au 4 coins de notre bain.



Figure 20. Photo du bain thermostatique

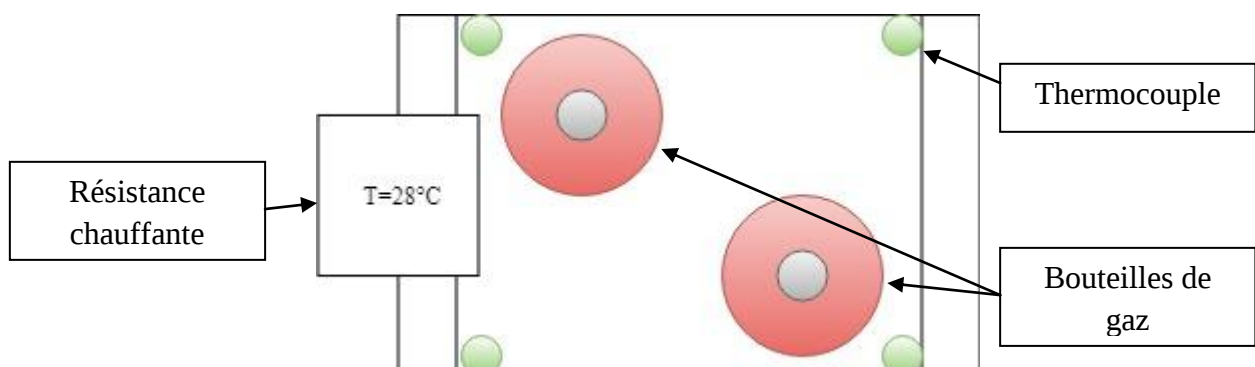


Figure 21. Représentation schématique du bain thermostatique (vue du dessus)

V.2.2 Les thermocouples

Un thermocouple est un capteur servant à mesurer la température. Il se compose de 2 métaux de natures différentes qui sont soudés à une extrémité. Cette jonction porte le nom de soudure chaude et sera installée dans le milieu dont on souhaite connaître la température. Les deux autres extrémités seront reliées aux bornes d'un voltmètre. Ces 2 jonctions portent le nom de soudure froide. Lors d'un chauffage, un potentiel électrique va être généré entre les deux bornes de soudure froide, qui sera ensuite transcrit en température.

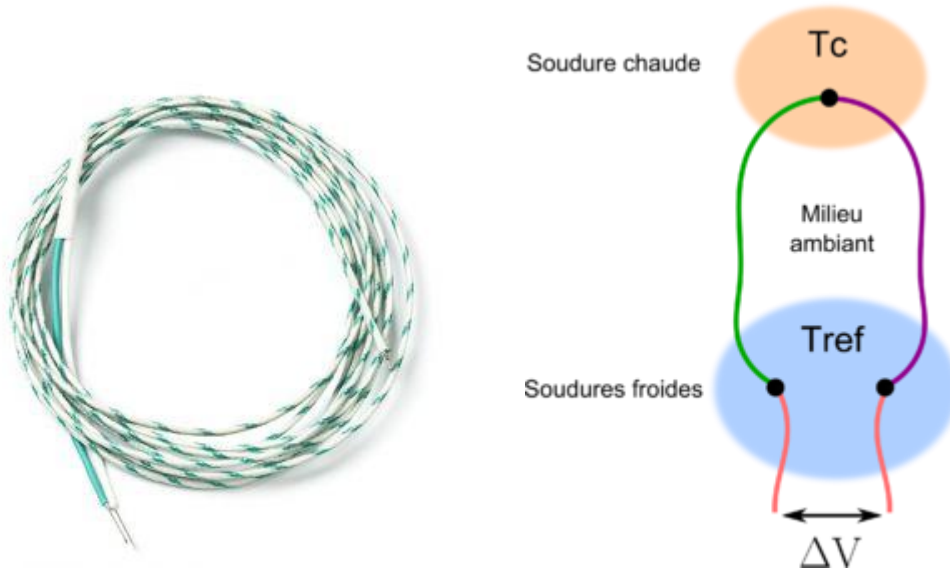


Figure 22. Photo d'un thermocouple de type K avec isolation en soie de verre torsadé (à gauche) et schéma de montage d'un thermocouple (à droite)

Il existe différents types de thermocouples dont la plage de température et la structure peuvent différer. Les thermocouples les plus communs sont les thermocouples K, T et J.

Des thermocouples de type K sont utilisés pour notre expérience. Ils sont composés d'un fil de chromel (alliage chrome+nickel) et d'un fil d'alumel (alliage aluminium +nickel). Ils possèdent une plage de température pouvant aller de -200°C à 1250°C . Ceux que nous utilisons possèdent une isolation en soie de verre torsadée (figure 20), ce qui permet de protéger les thermocouples contre les fortes chaleurs.

V.2.3 Validation du fonctionnement du bain thermostatique

Afin de vérifier l'homogénéité dans notre bain thermostatique, on choisit de mesurer la température aux coins du bain à l'aide de 4 thermocouples en effectuant un chauffage jusqu'à 31°C. On obtient une courbe représentant l'évolution de la température mesurée à l'aide des 4 thermocouples en fonction du temps :

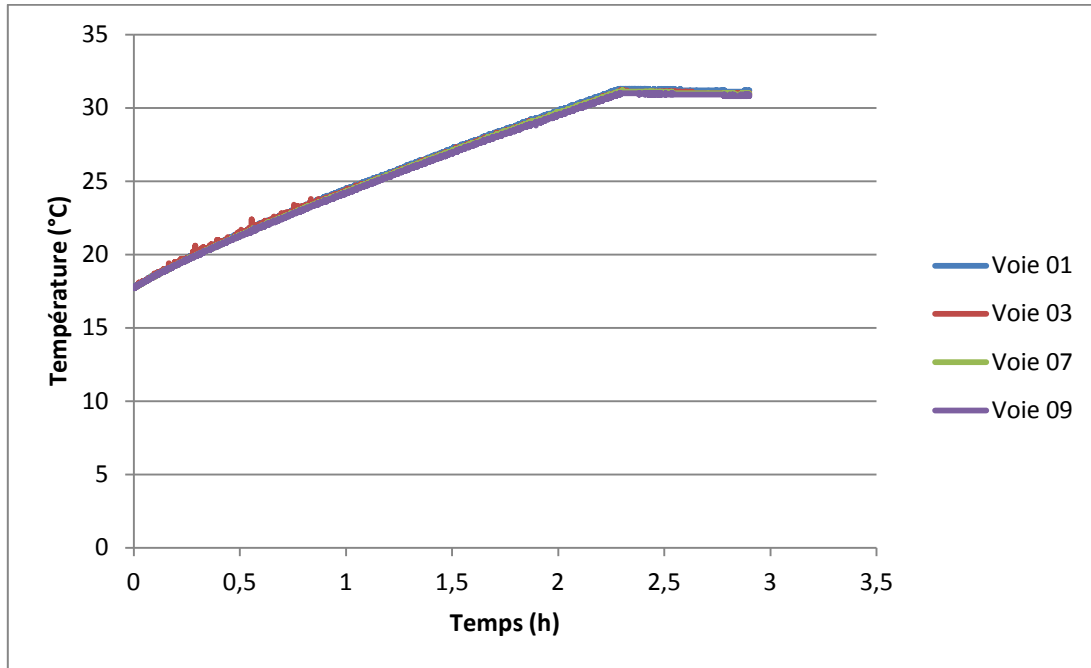


Figure 23. Courbes représentant l'évolution de la température dans le bain en fonction du temps

On voit que la répartition de température est bien homogène au cours du chauffage car les courbes des différents thermocouples se superposent. On observe également qu'il faut près de 2h10 pour que l'eau atteigne 31°C et que la température reste bien stable.

V.3 Régulation du four

Une fois le fonctionnement du bain thermostatique validé, les essais feus effectués à l'aide du four à gaz sont mis en place.

On va donc suivre l'évolution de la température dans le four, passant de la température ambiante jusqu'à plus de 800°C à l'aide de 3 thermocouples pendant 30 min. Pour cela, on utilise 3 thermocouples de type K. Ils seront placés en haut, au milieu et en bas :



Figure 24. Photo du positionnement des 3 thermocouples dans le four

On choisit une température de 28°C pour notre bain thermostatique car, après plusieurs essais à différentes températures, c'est cette dernière qui permet d'obtenir une pression correcte pour nos bouteilles de gaz (de 0 jusqu'à 1,2 bar).

V.4 Résultats expérimentaux

On trace l'évolution de la température des trois thermocouples placés à l'intérieur du four ainsi que la courbe correspondant à un feu ISO 834-1 :

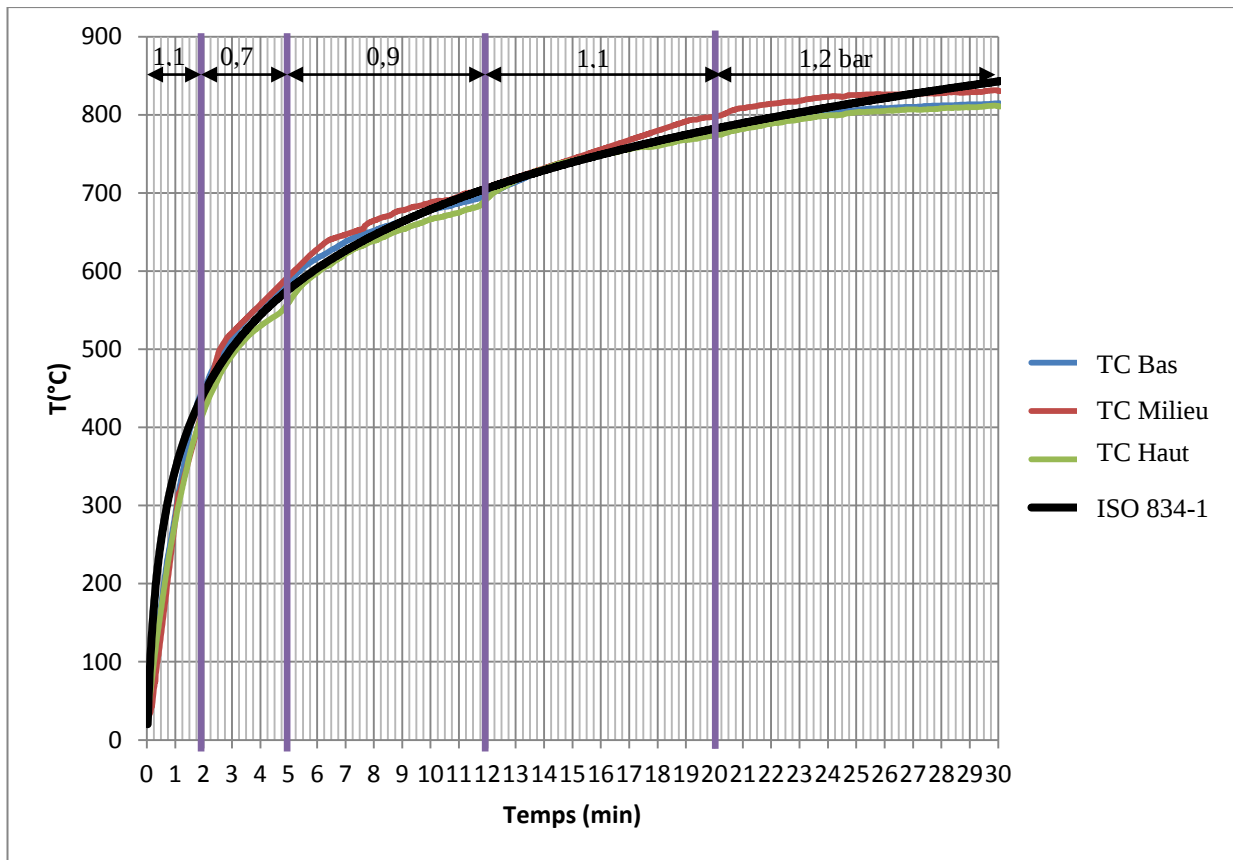


Figure 25. Evolution de la température dans le four en fonction du temps

On peut noter que le chauffage est très semblable à un feu ISO 834-1 durant tout le temps de chauffe. On remarque que la différence de température mesurée dans chaque thermocouple est de l'ordre d'une vingtaine de degrés, ce qui reste très correct.

La pression des gaz a été changée plusieurs fois afin de parvenir à suivre au mieux la courbe ISO 834-1. Elle est de 1,1 bar lors des 2 premières minutes, puis on la réduit jusqu'à 0,7 bar entre 2 et 5 min. Entre la 5^{ème} et la 12^{ème} minute, on l'augmente jusqu'à 0,9 bar. On l'augmente encore à 1,1 bar jusqu'à 20 minutes. Enfin, on choisit une pression de 1,2 bar jusqu'à la fin, car on a pu remarquer lors l'étude bibliographique le chauffage avait tendance à être moins sévère sur la fin.

Le chauffage est arrêté au bout de trente minutes. Au vu des mesures réalisées avec les trois thermocouples placés dans le four, à proximité de la surface de béton chauffée, l'homogénéité de la température dans le four apparaît satisfaisante. Les différents changements de pression des gaz ont donc bien permis d'améliorer le dispositif expérimental déjà en place.

Conclusion

En conclusion, ce rapport contient différentes études du comportement du béton lors d'essais à haute température.

Dans un premier temps, on a voulu travailler sur l'étanchéité du béton afin de le protéger contre la perte de masse liée au départ de l'eau lors d'une montée en température. Pour cela, plusieurs recherches sur différents revêtements ont été effectuées afin de sélectionner celui qui serait le plus efficace. On ne parvient cependant pas à réduire complètement la perte de masse et les revêtements essayés ne permettent pas la protection complète de nos échantillons puisqu'on observe la formation de fissure et de cloques. Il faudrait donc continuer à rechercher des produits plus performants et résistants afin de pouvoir diminuer cette perte de masse.

La seconde partie de mon stage consistait à l'amélioration d'un four à gaz permettant des essais feu sur le béton. A l'aide de la mise en place d'un bain thermostatique, on a pu jouer sur la pression envoyée dans le four et ainsi pu effectuer une montée en température dans le four globalement proche de la courbe ISO-834-1, se rapprochant ainsi d'un modèle représentant les véritables conditions d'un incendie.

D'un point de vue personnel, ce stage m'a avant tout fait découvrir le monde de la recherche, comment on y travaille, avec quelles méthodes, quels outils. Il m'a permis de participer concrètement à divers enjeux au travers de mission variées comme celle des essais feu sur le four à gaz que j'ai particulièrement apprécié.

Je me suis rendu compte que dans le métier de chercheur, la garantie d'un résultat n'est jamais certaine. Il faut en effet s'armer de patience et ne pas hésiter à persévérer dans le but d'améliorer les protocoles. Il faut aussi savoir faire face aux difficultés et trouver des solutions pour les contourner tout en ayant des contraintes physiques (matériel, temps, budget...). Avoir un regard critique sur ses résultats est très important pour réussir à les analyser correctement.

Le stage m'a également conforté dans mon envie de poursuivre mes études dans le domaine des matériaux (avec un master IMECA), plutôt que dans le secteur de l'aéronautique comme je l'avais en tête au début de l'année. Les matériaux représentent un secteur d'avenir qui finalement m'intéresse particulièrement et dans lequel il y a beaucoup de diversité.

Bibliographie

Convention de financement projet UCOMP, 2015

Boström et Lindqvist, 2006 : *Enquête des dégâts causés par l'incendie d'un pont par un camion*, Brandposten, No 34, Borås, Suisse, p. 28-29

Felicetti et al, 2017 : *Nouvelle méthode d'étude pour étudier l'influence de la pression des pores sur le comportement de fissure des bétons durant un chauffage*, Article scientifique. 11 p.

Gagne et Aitcin, 1993 : *Les superplastifiants pour la durabilité des bétons*, Comptes rendus de la conférence internationale sur la durabilité du béton, Monterrey, Octobre, Mexique, p. 200-217.

GénieCVL : Introduction sur le matériau béton : <http://www.geniecvl.com>

Guidebéton : L'ajout d'eau dans le béton : <http://www.guidebeton.com/ajout-eau-beton>

Kalifa P, G Chene et C Galle, 2001 : *Le comportement à haute température des fibres de polypropylène, recherches sur le ciment et le béton*, Vol31, p 1487-1499

Miah, 2015 : *Behaviour of Concrete at High Temperature: Spalling and Transient Thermal Strain (TTS)*, thèse de 1^{ère} année, 126p.

Mindeguia, 2009 : *Contribution expérimentale à la compréhension des risques d'instabilité thermique des bétons*. Thèse de doctorat de l'université de Pau et des Pays de L'Adour. 235 p.

Omega : Thermocouple : Qu'est-ce qu'un thermocouple? <http://www.omega.fr/prodinfo/.html>

Rilem et Chennai, 2017 : *First results on fast neutron tomography of heated concrete*. 5th International Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure, Borås, Sweden. 10 p.

TCSA : Capteurs de température, mesure et régulation : <http://www.tcsa.fr/>

Toropov et Toropova, 2015 : *Real-time measurements of temperature, pressure and moisture profiles in High-Performance Concrete exposed to high temperatures during neutron radiography imaging*. Article scientifique. 8 p.

Xing, 2006 : *Influence de la porosité et du degré d'humidité interne sur le comportement triaxial du béton* : Thèse de doctorat de l'université de Grenoble. 188 p.

Annexes

Annexe 1 : Liste des figures et des tableaux

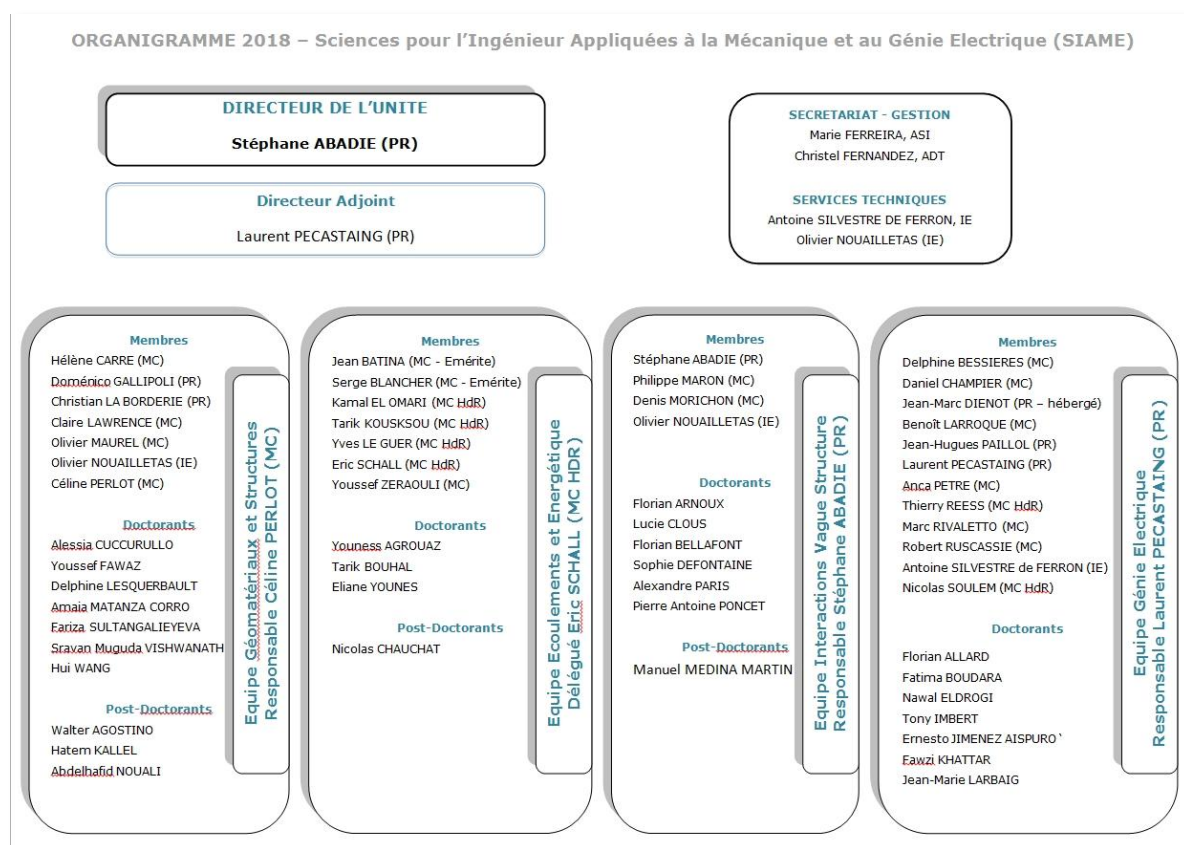
Liste des figures

Figure 1. Logo du SIAME	2
Figure 2. Photos du tunnel Saint Gotthard suite à l'incendie de 2001. A droite, effondrement du faux plafond en béton du tunnel	4
Figure 3. Relation entre résistance, perméabilité et porosité du béton [METHA, 1986]	7
Figure 4. Tableau des principales transformations du béton lors d'un chauffage (photo : [Mindeguia, 2009])	9
Figure 5. Perte de masse de 9 formulations différentes de béton [Jansson et Bostrom 2007]	9
Figure 6. Photo de l'éclatement d'un tablier de pont en Suède suite à l'incendie d'un camion citerne (à gauche) et éclatement d'un poteau de la tour Windsor à Madrid suite à un incendie de 2005 (à droite) (photo : [Bostrom et Lindqvist, 2006])	10
Figure 7. Four à gaz mobile (vue de l'arrière à gauche et vue de l'avant à droite)	11
Figure 8. Evolution de la température de l'éprouvette de mise au point en fonction du temps	11
Figure 9. Montage expérimental de la carotteuse	13
Figure 10. Schéma représentant la découpe d'échantillon effectuée à l'aide de la carotteuse	14
Figure 11. Scie utilisée pour obtenir les échantillons finaux	15
Figure 12. Schéma de découpe des échantillons (à gauche) et obtention des échantillons découpés (à droite)	15
Figure 13. Photo du four utilisé pour le chauffage des échantillons	19
Figure 14. Echantillon recouvert à l'aide de la colle athermafix	20
Figure 15. Courbes représentant la perte de masse des échantillons en fonction de la température	22
Figure 16. Echantillon colle cloqué (à gauche) et échantillon mastic fissuré (à droite) à 200°C	23
Figure 17. Echantillon colle cloqué et fissuré (à gauche) et échantillon mastic fissuré (à droite) à 600°C	23
Figure 18. Echantillon colle+alu (à gauche) et mastic+alu (à droite) fissurés à 600°C	23
Figure 19. Coloration échantillon test avant chauffage (à gauche) et après chauffage à 600°C (à droite)	24
Figure 20. Photo du bain thermostatique	25
Figure 21. Représentation schématique du bain thermostatique (vue du dessus)	25
Figure 22. Photo d'un thermocouple de type K avec isolation en soie de verre torsadé (à gauche) et schéma de montage d'un thermocouple (à droite)	26
Figure 23. Courbes représentants l'évolution de la température dans le bain en fonction du temps	27
Figure 24. Photo du positionnement des 3 thermocouples dans le four	28
Figure 25. Evolution de la température dans le four en fonction du temps	29

Liste des tableaux

Tableau 1. Les partenaires de la convention UCOMP	4
Tableau 2. Principaux constituants d'un ciment ordinaire	7
Tableau 3. Exemples de colles epoxy	16
Tableau 4. Exemples de colles silicate de sodium	17
Tableau 5. Produits utilisés pour travailler sur l'étanchéité des échantillons	18
Tableau 6. Tableau représentant les différentes catégories d'échantillons étanchés	19
Tableau 7. Perte de masse colle et mastic en fonction de la température	20

Annexe 2 : Organigramme du SIAME



Annexe 3 : Tableau représentant les caractéristiques des différents ciments les plus courants :

TYPES DE CIMENT	CLINKER K %	AUTRES CONSTITUANTS PRINCIPAUX S/D/P/Q/V/W/T/L/LL %	CONSTITUANTS SECONDAIRES %
CEM I CIMENT PORTLAND	95 à 100	0	0 à 5
CEM II CIMENT PORTLAND COMPOSÉ	65 à 94	6 à 35 S/D/P/Q/V/W/T/L/LL	0 à 5
CEM III CIMENT DE HAUT FOURNEAU	5 à 64	LAITIER : 36 à 95	0 à 5
CEM IV CIMENT POUZZOLANIQUE	45 à 89	D/P/Q/V/W : 11 à 55	0 à 5
CEM V CIMENT COMPOSÉ	20 à 64	26 à 80 S/P/Q/V	0 à 5

Annexe 4 : Tableau des différentes masses et pertes de masse en fonction de la température (partie IV) :

Echantillons	20°C	20°C	20°C	20°C
	Masse béton(g)	Masse béton + protection	Masse alu	Masse colle/mastic
MA1	180,01	219,23	1	38,22
MA2	166,99	208,37	1	40,38
M1	84,78	91,2	0	6,42
M2	166,72	176,17	0	9,45
CA1	176,33	240,35	1	63,02
CA2	168,01	237,33	1	68,32
C1	72,55	84,13	0	11,58
C2	167,6	188,32	0	20,72
7.1H	174,67	165,57	0	0
6.3B	165,1	158,18	0	0
P3	46,18	45,27	0	0
P4	46,81	45,83	0	0
P5	87,74	84,68	0	0

Masse 200°C(g)	Perte masse 200°C(%)	Masse 400°C(g)	Perte masse 400°C (%)	Masse 600°C(g)	Perte masse 600°C(%)
202,03	2,6	198,84	4,2	196,47	5,0
191,24	2,4	188,21	4,0	185,84	4,9
88,52	0,9	87,54	2,0	85,56	4,1
168,35	3,0	166,2	4,2	164,33	5,2
220,16	3,6	216,04	5,4	212,67	6,4
218,01	2,6	214,94	3,8	211,65	4,8
81,09	0,9	80,14	2,0	78,22	4,3
179,54	2,7	177,24	3,9	175,48	4,6
165,57	5,2	163,55	6,4	162,66	6,9
158,18	4,2	156,28	5,3	155,24	6,0
45,27	2,0	44,91	2,8	44,04	4,6
45,83	2,1	45,48	2,8	44,52	4,9
84,68	3,5	81,94	6,6	81,07	7,6

Résumé

De nombreux incendies ont frappé d'importants ouvrages de béton ses dernières années comme celui du tunnel du Mont-Blanc en 1999 ou celui du tunnel sous la Manche en 2008. Il est alors important de connaître l'impact réel de ces incendies sur le béton pour optimiser le coût des réparations tout en garantissant la sécurité des usagers. La problématique de résistance au feu est essentielle puisque les éclatements qui peuvent accompagner la diminution de résistance du matériau sont de nature à fragiliser fortement les structures.

Ce travail propose une étude sur le comportement des bétons à haute température, et plus particulièrement sur la capacité de protéger le béton contre la perte de masse liée au départ de l'eau lorsqu'on le chauffe à de hautes températures. Des essais feus ont également été effectués afin d'améliorer un four à gaz servant à des tests d'écaillage sur le béton.

Pour cela, la perte de masse d'échantillons de béton soumis à différentes températures (200, 400 et 600°C) a été mesurée. Afin d'améliorer le four à gaz, un bain thermostatique a été mis en place, permettant de réguler la pression des gaz afin de pouvoir modifier la température pour qu'elle suive une courbe de chauffage ISO 834-1, courbe proche de celle d'un incendie.

Mots-clés : Incendies, béton, résistance au feu, haute température, perte de masse, essais feu, four à gaz, écaillage, ISO 834-1.

Abstract

Numerous fires affected important structures made of concrete such as the Manche tunnel in 2008 or the Mont-Blanc tunnel in 1999. This is why it is important to know the real impact of these fires on concrete to optimize the cost of repairs while still guarantee the safety of users. Fire resistance of concrete is a very important subject because the possible spalling coupled with a decrease of the strength of the material can deeply weaken the structures.

This work is about studying concrete behavior at high temperature, more precisely about trying to protect the concrete against mass loss when being heat at high temperature. Fire tests were made to improve a gas furnace that allow spalling tests on concrete.

In order to do so, mass loss at different temperature levels was measured. To improve the gas furnace, a thermostatic bath was set to regulate gas pressure in order to change the temperature in the furnace so it can follow a ISO 834-1 curve, that is close to a real fire curve.

Keywords : Fires, concrete, fire resistance, spalling, high temperature, mass loss, gas furnace, ISO 834-1