



**HAL**  
open science

# Proposition d'une nouvelle formulation mathématique pour l'analyse du comportement hydro thermo mécanique des structures fonctionnellement graduées

Fouad Boukhelf

► **To cite this version:**

Fouad Boukhelf. Proposition d'une nouvelle formulation mathématique pour l'analyse du comportement hydro thermo mécanique des structures fonctionnellement graduées. Matériaux. Université de La Rochelle; Université Djillali Liabès (Sidi Bel-Abbès, Algérie), 2020. Français. NNT : 2020LAROS030 . tel-03546652

**HAL Id: tel-03546652**

**<https://theses.hal.science/tel-03546652v1>**

Submitted on 28 Jan 2022

**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.



La Rochelle Université

École doctorale 618 EUCLIDE

Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour  
l'Environnement UMR CNRS 7356 (LaSIE)

Université de Djillali Liabès de Sidi Bel Abbès

Laboratoire des Structures et Matériaux Avancés dans le  
Génie Civil et Travaux Publics



THÈSE DE DOCTORAT EN COTUTELLE

Présentée par :

***Fouad BOUKHELF***

Soutenue le 09 Décembre 2020

pour l'obtention du grade de Docteur de La Rochelle Université  
& l'Université de Djillali Liabès de Sidi Bel Abbès

Discipline : Génie civil

**Proposition d'une nouvelle formulation mathématique pour l'analyse du  
comportement thermo hydro mécanique des structures fonctionnellement  
graduées**

JURY :

|                      |   |
|----------------------|---|
| El hadj KADRI        | Professeur, CY-Cergy-Paris Université, Président du jury            |
| Ammar YAHIA          | Professeur, Université l'Université de Sherbrooke Canada, Examineur |
| Abdelkader TAHAKOURT | Professeur, Université Abderrahmane Mira-Bejaia, Examineur          |
| Sid Ahmed MEFTAH     | Professeur, Université Djillali Liabès, Examineur                   |
| Baghdad KROUR        | Maitre de conférences HDR, Université Djillali Liabès, Examineur    |
| Abdelkrim TRABELSI   | Maître de conférences, Université Claude Bernard Lyon 1, Encadrant  |
| Rafik BELARBI        | Professeur, La Rochelle Université, Directeur de thèse              |
| Mohamed B. BOUIADJRA | Professeur, Université Djillali Liabès, Directeur de thèse          |

## Remerciements

Cette thèse de doctorat a été réalisée en cotutelle entre le Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement de La Rochelle Université-CNRS et le Laboratoire des Structures et Matériaux Avancés dans le Génie Civil et Travaux Publics de l'Université de Sidi Bel Abbés, sous la direction du Professeur Rafik BELARBI et du Professeur Mohamed BACHIR BOUIADJRA. Je tiens à les remercier très chaleureusement pour avoir accepté de diriger cette thèse. Ce travail a été cofinancé par le programme Algéro-Français PROFAS B+, le programme CPER-FEDER (2015-2020) Bâtiment Durable, Axe 2 MADUR « Matériaux de construction performants à faible impact environnemental, durables et résilients » et par le Laboratoire commun 4evLab « LaSIE, CNRS, EDF R&D ». Je tiens à présenter à ces institutions mes sincères remerciements pour leur soutien financier qui m'a permis de mener à bien mes travaux de recherche et d'entreprendre les mobilités entre la Rochelle Université et l'Université de Sidi Bel Abbés.

J'adresse mes vifs et sincères remerciements à mon directeur de thèse, Pr. Rafik BELARBI, pour son entière disponibilité, ses critiques, orientations, approches scientifiques, conseils et ses directives pertinentes tout au long de cette étude. Son recul et son expérience m'ont permis d'orienter mes travaux tout le long de cette investigation. Les mots semblent faire défaut quand il s'agit d'exprimer son investissement tant scientifique, humain et même financier dans le déroulement de cette thèse.

Je tiens aussi à exprimer mes sincères remerciements au Pr. Mohamed BACHIR BOUIADJRA, qui a dirigé mes recherches et qui a consacré une bonne partie de son temps à m'aiguiller, me conseiller et me motiver le long de cette thèse. Ses conseils pertinents et constructifs, ses compétences et ses encouragements ont été un réel moteur pour moi.

Je souhaite ensuite, exprimer ma profonde reconnaissance à M. Abdelkrim TRABELSI qui a encadré ce travail. Il n'a ménagé aucun effort pour m'encourager et me diriger à travers ses conseils utiles, ses directives pertinentes et sa disponibilité.

J'adresse aussi mes remerciements à chacun des membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de juger ce travail et aussi pour tout le temps passé à lire, analyser et évaluer mon travail. Au Président de Jury, El Hadj KADRI, Professeur à CY Cergy-Paris Université pour l'intérêt qu'il a porté à ce sujet de thèse, à Ammar YAHIA, Professeur à l'Université de Sherbrooke et à Abdelkader TAHAKOURT, Professeur à l'Université de Bejaia pour avoir porté un regard critique à ce manuscrit en tant que rapporteurs. A M. Baghdad KROUR,

Maitre de Conférences HDR à l'Université de Sidi Bel Abbés et à MEFTAH Sid Ahmed, Professeur à l'Université de Sidi Bel Abbés d'avoir accepté d'évaluer ce travail.

Je tiens aussi à remercier le directeur du Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement LaSIE, Pr. Xavier FEAUGAS et le directeur du Laboratoire des Matériaux et Hydrologie Pr. Abdelouahed TOUNSI, Dr. Mohamed Atif BENATTA le Vice Doyen de la faculté de Technologie de l'Université de Sidi Bel Abbés, Dr. Ameer HAMAMI, le chef du Département de Génie Civil de La Rochelle Université et le directeur de l'école doctorale Euclide Pr. Abdelkarim AÏT MOKHTAR, pour leur accueil.

Je voudrai également exprimer mes remerciements à Rachid CHERIF qui a aussi contribué à ce travail grâce à ses précieux conseils, ses remarques toujours pertinentes. Il m'a fait bénéficier de ses compétences ainsi que de son expérience. Mes remerciements vont également à mes collègues et amis Ferhat Benmahiddine, Abderrahmen MERIOUA, Ahmed DEEB, Khaled BENALI, Ahmed Kamel Tedjditi et Yassine BELARBI. Je garderai des souvenirs inoubliables de mes années de thèse grâce à vous.

Je remercie également chaleureusement tous les collègues du LaSIE, notamment Dr. Akli Younsi, toutes les équipes techniques et administratives du Laboratoire pour leur aide, disponibilité et l'excellente ambiance de travail. Je pense, notamment, à Armelle NOUVIAIRE, Bruno PERAUDEAU, Mathieu LEMAIRE, Samira EL AMRANI et Dr. Egle CONFORTO, responsable de la plateforme de microscopie.

Enfin, je ne remercierai jamais assez mes parents et toute ma famille pour leur soutien inconditionnel et leur amour. Sans eux rien de tout cela n'aurait été possible. **Je leur dédie ce travail.**

## *Résumé*

Ces dernières décennies ont connu l'émergence de nouvelles exigences et enjeux énergétiques et environnementaux donnant naissance à de multiples réflexions dans le secteur de la construction des bâtiments (neufs et anciens). Elles ont trait, notamment, au développement des éco-matériaux de construction innovants et durables. Afin de pallier à ces problématiques, de nombreux travaux de recherche et de développement ont vu le jour. Parmi ces derniers, se trouve la substitution du ciment par d'autres alternatives non-biodégradables. Cette voie prometteuse permet de : (i) réduire considérablement l'empreinte environnementale, (ii) préserver les ressources naturelles, et (iii) diminuer le coût global de la construction. La littérature fait état des travaux récents dans ce domaine dédiés aux aspects mécanique et de durabilité de ces éco-matériaux à base de verre recyclé. Néanmoins, leur comportement hydrique et thermique reste très peu voire pas du tout abordé.

Dans le cadre du travail de thèse, l'influence de l'incorporation de la poudre de verre, et des additions minérales, dont la fumée de silice sur les propriétés mécaniques, microstructurales, hydriques et thermiques a été entreprise. Ces investigations expérimentales ont mis en évidence qu'une substitution massique du ciment par 20% et 30% du verre diminue légèrement la résistance mécanique du béton qui prend des valeurs allant de 30 à 40 MPa. Néanmoins, ces valeurs demeurent suffisantes pour une utilisation de ces éco-bétons dans la construction. En outre, l'incorporation du verre dans le béton améliore ces propriétés thermiques et augmente la capacité de stockage d'humidité.

Par ailleurs et dans l'optique de simuler les transferts couplés de chaleur et d'humidité au sein des matériaux d'enveloppe de bâtiment, constitués de ces éco-bétons, une modélisation numérique a été développée. Outre la prise en compte des mécanismes de transferts dominants de chaleur et de masse, les radiations solaires et des scénarii de précipitations ont été considérées. Les paramètres de transferts ont été évalués par une méthode inverse tout en réduisant le temps de caractérisation. Par la suite, la validation expérimentale du modèle élaboré a été effectuée moyennant la conception et la réalisation d'une plateforme expérimentale: au laboratoire LaSIE capable de d'étudier la réponse d'une paroi de bâtiment (1.3x1.3 m<sup>2</sup>) à des sollicitations climatiques réaliste. Ces dernières ont été rendues possible d'une part grâce à l'incorporation des simulateurs d'ensoleillement et de précipitation et d'autre part via une instrumentation permettant le suivi des profils spatio-temporels de la température et de l'hygrométrie au sein du matériau d'enveloppe et au niveau de l'ambiance intérieure du bâtiment.

La confrontation des résultats numériques et ceux issue de la campagne expérimentale à mis en exergue l'aptitude du modèle numérique à simuler le comportement hygrothermique des parois d'enveloppes permis soumises à des sollicitations dynamiques variable et réaliste.

Enfin, une autre typologie des éco-bétons a été étudiée par l'intermédiaire d'une approche de modélisation théorique, Il s'agit de matériaux innovants ayant des propriétés adaptées et fonctionnellement graduées « FGM ». L'élaboration de ces matériaux est réalisable moyennant des nouvelles techniques d'impression 3D, conception des dépôts par fusion FDM, et la stéréolithographie SLA. Sur le plan théorique, l'influence des contraintes hygrothermiques sur la réponse mécanique est souvent négligée. Le couplage de ces contraintes de Piola-Kirchhoff avec le modèle mécanique de Green-Lagrange a permis de mieux appréhender le comportement des structures en FGM.

**Mots clés :** Caractérisation des éco-bétons, béton à base de poudre de verre, modélisation numérique des transferts hygrothermiques, plateforme expérimentale à l'échelle de la paroi, validation expérimentale, matériaux fonctionnellement gradué FGM.

## *Abstract*

The recent decades have seen the emergence of new energy and environmental requirements and challenges giving rise to multiple reflections in the building construction sector (new and old construction). They relate, notably, to the development of innovative and sustainable building eco-materials. In order to overcome these problems, numerous research and development projects have been carried out. Among the latter, we might mention the substitution of cement by other non-biodegradable alternatives. This promising way permits to, (i) significantly reduce the environmental footprint, (ii) preserve natural resources and (iii) reduce the overall cost of construction. The literature reports recent works in this field dedicated to the mechanical and durability aspects of these glass eco-materials recycled. Nevertheless, their hydric and thermal behavior remains barely or not at all addressed. Within the framework of this thesis work, the influence of the incorporation of glass powder and mineral additions, including silica fume, on the mechanical, microstructural, hydric and thermal properties was undertaken. These experimental investigations have shown that a mass substitution of cement by 20% and 30% of glass slightly reduces the mechanical strength of concrete, which takes values ranging from 30 to 40 MPa. However, these values remain sufficient for the use of these eco-concretes in construction. In addition, the incorporation of glass in concrete improves its thermal properties and increases the moisture storage capacity. Furthermore, for purposes of simulating the coupled heat and moisture transfers within the building envelope materials made of these eco-concretes, a numerical modeling has been developed. Besides the inclusion of the dominant heat and mass transfer mechanisms, solar radiations and precipitation scenarios were considered. The transfer parameters were evaluated by an inverse method while reducing the characterization time. Thereafter, the experimental validation of the developed model was carried out through the design and implementation of an experimental platform at the LaSIE laboratory which is capable to study the response of a building wall (1.3x1.3 m<sup>2</sup>) to realistic climatic stresses. These were made possible, on the one hand, by the incorporation of sunshine and precipitation simulators and, on the other hand, by an instrumentation allowing the monitoring of the spatio-temporal profiles of temperature and hygrometry within the envelope material and at the level of the building's interior atmosphere. Finally, another typology of eco-concretes has been studied using a theoretical modeling approach. These are innovative materials with adapted and functionally graded properties "FGM". The elaboration of these materials is achievable using new 3D printing techniques, FDM fusion deposit design, and SLA stereolithography. On the

theoretical level, the influence of hygrothermal stresses on the mechanical response is often neglected. The coupling of these constraints of Piola-Kirchhoff with the mechanical model of Green-Lagrange allowed a better understanding of the behavior of structures in FGM.

**Keywords:** Characterization of eco-concrete, waste glass powder concrete, numerical modeling of hygrothermal transfers, wall true to scale experimental platform, experimental validation, functionally graduated material FGM.

# **INTRODUCTION GENERALE ET CONTEXTE**



La transition énergétique et environnementale constitue un des enjeux sociétaux majeurs de la prochaine décennie. Une des pistes principales pour relever ces défis est sans doute le secteur de la construction eu égard à son poids sur la consommation énergétique globale et sur les émissions des gaz à effet de serre. Une des voies permettant d'assurer ces fins est l'utilisation prudente des ressources naturelles en mettant l'accent sur la revalorisation et le recyclage des déchets de démolition ainsi la diminution du coût des matériaux de construction [1]. En effet, des quantités importantes des déchets de démolition sont générées, et souvent entreposées dans des décharges sauvages. Leur valorisation dans des nouveaux bétons constitue aujourd'hui une nouvelle opportunité de préserver les ressources naturelles qui ont tendance à un épuisement [2][3][4][5][6][7]. Une des voies prometteuses pour pallier à cette problématique est d'utiliser des déchets, notamment, ceux à base de verre comme alternative partielle du ciment ou encore des granulats qui entrent dans la composition du béton. Le recyclage du verre dans le béton permet de contribuer à la réduction de l'impact environnemental de ce matériau de construction indispensable, et d'atteindre un équilibre entre les contraintes de protection de l'environnement et les considérations économiques et sociales. En effet, plus de 90 000 tonnes de verre en moyenne ont été récupérées à travers divers systèmes au Québec [8][9][10][11][12]. Des solutions novatrices testées avec succès au Québec seront appliquées dans le contexte Français et Algérien.

Néanmoins, l'irrégularité des caractéristiques intrinsèques des granulats et de verre recyclés et l'absence de normes en vigueur freinent leur vulgarisation comme un constituant dans la formulation des bétons. Il est important de faire rappeler, l'existence de peu de travaux sur la caractérisation expérimentale de ces matériaux surtout sur les aspects hydrique, thermique et en relation avec leur microstructure. Pour pallier à ce manque de données, une caractérisation mécanique, hydrique, thermique et physique de ce type de matériaux a été entreprise.

En France, la certification « NF Démarche I HQE (Haute Qualité Environnementale) » propose une méthode de travail représentée par une trame pour toutes les étapes de la construction, la durée de vie de la construction, la maintenance et la démolition afin de réaliser un bâtiment respectueux de l'environnement et qui repose sur l'utilisation des nouvelles technologies et des matériaux à faible empreinte environnementale. Ces derniers sont consomment peu d'énergie lors de la production, fabrication et démolition. C'est ce qu'on appelle énergie grise<sup>1</sup>. On utilisera pour cela les matériaux issus de déchets inertes

---

<sup>1</sup> Démarche HQE, Applications en région Champagne Ardenne. Février 2005

comme le verre et d'autres substitutions de ciment dans le but de réduire le taux d'émission de gaz à effet de serre.

En Algérie, une politique d'économie d'énergie engagée récemment par l'état dans laquelle le secteur du bâtiment est interpellé au premier plan en tant que secteur énergivore. La problématique découle des préoccupations relatives à la protection de l'environnement, l'utilisation judicieuse de l'énergie et le développement durable<sup>2</sup>.

Plusieurs études ont montré l'influence des transferts couplés de chaleur et de masse sur les performances énergétiques et environnementales du bâtiment [13][14]. De plus, dans le domaine du Génie Civil, le comportement hydrique des matériaux poreux utilisés, tel que le béton, participe aux mécanismes altérant la durabilité des constructions d'une part, et influe sur la réponse globale des structures d'autre part.

Face à ces nombreuses problématiques et en égard au contexte général lié à la transition énergétique et environnementale, ces activités de recherche seront focalisées sur deux parties successives :

- ✓ La première porte sur l'étude du comportement des structures fonctionnellement graduées soumises à des sollicitations mécanique, thermique et hydrique (partie entreprise à l'Université de Sidi Bel Abbas).
- ✓ La deuxième est dédiée en une investigation sur la formulation, la caractérisation microstructurale, thermique et hydrique des bétons à base de déchets recyclés (poudre de verre et fumée de silice) et leurs réponses à des sollicitations climatiques dynamiques (partie réalisée à La Rochelle Université).

Pour ce faire, il est proposé d'entreprendre la démarche suivante qui est déclinée, outre une introduction générale et conclusions, en six chapitres :

- Le chapitre I, synthétise un état de l'art sur les modèles de prédiction du comportement des structures, une revue synthétique sur les matériaux à gradient de propriétés est ainsi présentée.
- Le chapitre II, présente le modèle mathématique proposé, décrivant le comportement d'une plaque fonctionnellement graduée, soumise à un chargement mécanique, un gradient de température et un gradient de concentration d'humidité. Son objectif est le couplage du comportement thermique et hydrique et leurs réponses sur le

---

<sup>2</sup> <https://www.algerie-eco.com/>

comportement mécanique global, prenant en considération de l'effet de gauchissement de la section transversale en se basant sur les théories d'ordre élevé. Les résultats obtenus sont comparés avec ceux de la théorie classique de Love-Kirchhoff et à d'autres existant dans la littérature.

- Dans le chapitre III est développé un état de l'art relatif aux modèles de transferts de chaleur et d'humidité dans les milieux poreux où les différents paramètres d'entrée alimentant ces modèles ainsi que les techniques expérimentales pour les caractériser sont présentés. Aussi, les résultats issus de de la littérature sont discutés.
- Lors du chapitre IV est développé le programme expérimental et les résultats de la caractérisation physique, mécanique, hydrique, et thermique pour sept (07) formulations choisies, ces dernières sont constituées d'un remplacement partiel du ciment CEM I/CEM V par d'autres alternatives comme la poudre de verre, la fumée de silice. Les résultats de l'étude expérimentale effectuée pour les différentes formulations de béton considérées sont présentés et discutés dans cette section. Il s'agit de la résistance à la compression, la porosité accessible à l'eau et par intrusion de mercure, l'analyse thermogravimétrique (ATG), l'analyse par microscope électronique à balayage (MEB), les isothermes de sorption, la conductivité thermique, la chaleur spécifique et la perméabilité à la vapeur d'eau.
- Dans le chapitre V est décrit la nouvelle plateforme expérimentale que j'ai mis en place au laboratoire dans la première partie. Elle est dédiée à l'étude du comportement hygrothermique d'une paroi de bâtiment ( $1.3 \times 1.3 \text{m}^2$ ) soumise à des sollicitations climatiques de (précipitations, ensoleillement, température, humidité relative). Leur réponse sur le comportement du bâtiment est évaluée. Les différents systèmes adoptés pour simuler les conditions climatiques ainsi qu'une qualification du banc expérimental sont décrits. De plus, et dans la deuxième partie est développé un modèle de prédiction de transfert couplé de chaleur et de masse basée sur l'établissement des équations de conservation de l'énergie et de la masse des espèces en présence. Sa formulation a permis d'aboutir in fine à un système d'équations aux dérivées partielles « EDP » fortement couplées, sa résolution a été effectuée par l'intermédiaire de la méthode des éléments finis « MEF » en utilisant le solveur Comsol Multiphysics. Le

choix des moteurs de transfert est lié aux conditions aux limites (température, pression de vapeur), et aux types de capteurs utilisés dans la section précédente.

Lors de la deuxième partie, est présentée une contribution à l'estimation du coefficient de diffusion hydrique en régime dynamique, à travers un essai d'imbibition et l'exploitation des profils d'humidité, moyennant la méthode inverse du gradient descendant. Enfin, la troisième partie est dédiée à l'analyse des résultats expérimentaux et numériques obtenus et leur confrontation.

### Références bibliographies

- [1] A. P. Galvin, F. Agrela, J. Ayuso, M. G. Beltran, and A. Barbudo, “leaching assessment of concrete made of recycled coarse aggregate: physical and environmental characterisation of aggregates and hardened concrete,” *Waste Manag.*, vol. 34, pp. 1693–1704, 2014.
- [2] W. S. Fahmy, E. A.-L. Heneidy, E. E. Ali, and I. S. M. Agwa, “Mechanical properties of concrete containing recycled concrete aggregates subjected to different fire durations,” *J. Eng. Sci. Assiut Univ.*, vol. 39, no. September, pp. 1005–1019, 2011.
- [3] S. A. Santos, P. R. da Silva, and J. de Brito, “Mechanical performance evaluation of self-compacting concrete with fine and coarse recycled aggregates from the precast industry,” *Materials (Basel)*, vol. 10, no. 8, 2017.
- [4] A. Gholampour and T. Ozbakkaloglu, “Time-dependent and long-term mechanical properties of concretes incorporating different grades of coarse recycled concrete aggregates,” *Eng. Struct.*, vol. 157, no. February, pp. 224–234, 2018.
- [5] K. H. Tan and H. Du, “Use of waste glass as sand in mortar: Part i - Fresh, mechanical and durability properties,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 35, no. 1, pp. 118–126, 2013.
- [6] M. Adaway and Y. Wang, “Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in structural concrete -Effects on compressive strength,” *Electron. J. Struct. Eng.*, vol. 14, no. 1, pp. 116–122, 2015.
- [7] N. N. Gerges, C. A. Issa, S. A. Fawaz, J. Jabbour, and J. Jreige, “Recycled Glass Concrete : Coarse and Fine Aggregates,” *EJERS, Eur. J. Eng. Res. Sci.*, vol. 3, no. 1, pp. 1–9, 2018.
- [8] R. Idir, M. Cyr, and A. Tagnit-Hamou, “Use of fine glass as ASR inhibitor in glass aggregate mortars,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 7, pp. 1309–1312, 2010.
- [9] A. Zidol, A., Pavoine, A. and Tagnit-Hamou, “Effect of Glass Powder on Concrete Permeability,” *Int. Congr. Concr. Durability, Trondheim, Norw.*, p. 15, 2012.
- [10] R. Idir, M. Cyr, and A. Tagnit-Hamou, “Pozzolanic properties of fine and coarse color-mixed glass cullet,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 33, no. 1, pp. 19–29, Jan. 2011.
- [11] N. A. Soliman and A. Tagnit-Hamou, “Development of ultra-high-performance concrete using glass powder – Towards ecofriendly concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 125, pp. 600–612, 2016.
- [12] A. Zidol, M. T. Tognonvi, and A. Tagnit-Hamou, “Effect of Glass Powder on Concrete Sustainability,” *New J. Glas. Ceram.*, vol. 07, no. 02, pp. 34–47, 2017.
- [13] M. Y. Ferroukhi, R. Djedjig, K. Limam, and R. Belarbi, “Hygrothermal behavior

modeling of the hygroscopic envelopes of buildings: A dynamic co-simulation approach,” *Build. Simul.*, vol. 9, no. 5, pp. 501–512, 2016.

- [14] R. Djedjig, E. Bozonnet, and R. Belarbi, “Modeling green wall interactions with street canyons for building energy simulation in urban context,” *Urban Clim.*, vol. 16, pp. 75–85, 2016.

## *Sommaire*

Remerciements

Résumé

Abstract

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

|  |    |
|--|----|
| INTRODUCTION GENERALE ET CONTEXTE.....   | 1  |
| I. CHAPITRE I. GENERALITES SUR LES MATERIAUX A GRADIENT DE PROPRIETES .....                              | 7  |
| I.1 Introduction .....   | 7  |
| I.2 Concept des matériaux à gradient de propriétés .....   | 9  |
| I.3 Fabrication des FGM .....  | 10 |
| I.4 Les FGM dans le génie civil.....   | 13 |
| I.5 Lois régissant la variation des propriétés matérielles des plaques FGM.....                          | 15 |
| I.5.1 Propriétés matérielles de la plaque P-FGM :.....   | 16 |
| I.5.2 Propriétés matérielles de la plaque S-FGM.....   | 17 |
| I.5.3 Propriétés matérielles de la poutre E-FGM :.....   | 18 |
| I.6 Théorie des poutres et plaques.....  | 19 |
| I.7 Les modèles mathématiques des plaques FGM.....   | 20 |
| I.7.1 La théorie classique des plaques minces de Love-Kirchhoff (CPT) .....                              | 20 |
| I.7.2 La théorie de déformation en cisaillement du premier ordre (FSDT) .....                            | 21 |
| I.7.3 La théorie de déformation en cisaillement d'ordre élevé (HSDT) .....                               | 23 |
| I.8 Conclusion .....   | 25 |
| II. CHAPITRE II. ETUDE DE LA RÉPONSE HYGRO-THERMO-MÉCANIQUE DES PLAQUES FONCTIONNELLEMENT GRADUÉES ..... | 26 |
| II.1 Introduction .....  | 26 |
| II.2 Formulation mathématique.....   | 27 |
| II.2.1 Champ de déplacement.....   | 28 |
| II.2.2 Équations constitutives .....   | 29 |
| II.2.3 Le principe du travail virtuel .....  | 30 |
| II.3 Solution analytique pour une plaque simplement appuyée .....  | 32 |
| II.4 Résultats et discussion .....   | 34 |
| II.4.1 Etude comparative 1 .....   | 34 |
| II.4.2 Etude comparative 2 .....   | 37 |
| II.4.3 Etude paramétrique.....   | 39 |

|         |  |     |
|---------|--|-----|
| II.5    | Conclusion .....   | 52  |
| III.    | <b>CHAPITRE III. ETAT DE L'ART SUR LES ECO-BETONS ET LES TRANSFERTS HYGROTHERMIQUES DANS UN MILIEU POREUX</b>  |     |
| III.1   | Introduction .....   | 53  |
| III.2   | Contexte général sur la valorisation des déchets dans les bétons .....   | 53  |
| III.2.1 | Le recyclage du verre .....  | 54  |
| III.3   | Synthèse générale sur les éco-bétons.....  | 58  |
| III.4   | Définitions et caractérisation de la structure poreuse des bétons .....  | 60  |
| III.4.1 | Les propriétés thermiques du béton.....  | 60  |
| III.4.2 | La chaleur spécifique.....   | 64  |
| III.4.3 | L'inertie thermique.....   | 65  |
| III.4.4 | La diffusivité thermique [D].....  | 66  |
| III.4.5 | L'effusivité thermique [b] .....   | 66  |
| III.5   | Les propriétés physiques et hydriques du béton .....   | 66  |
| III.5.1 | Teneur en eau.....   | 67  |
| III.5.2 | Porosité, porosité accessible à l'eau, porosité par intrusion de mercure .....   | 68  |
| III.5.3 | Humidité relative .....  | 72  |
| III.5.4 | Surface spécifique.....  | 73  |
| III.5.5 | Isothermes de sorption (adsorption/désorption) .....   | 76  |
| III.5.6 | Modèles d'isothermes de sorption-désorption.....   | 83  |
| III.5.7 | La tortuosité.....   | 85  |
| III.5.8 | Perméabilité à la vapeur d'eau : .....   | 85  |
| III.5.9 | Isotherme de sorption .....  | 89  |
| III.6   | Modèles mathématiques de transferts hygrothermiques dans les matériaux poreux. 90  |     |
| III.6.1 | Modèle de Luikov.....  | 91  |
| III.6.2 | Modèle de Philip & De Vries .....  | 93  |
| III.6.3 | Modèle de Künzle.....  | 94  |
| III.6.4 | Synthèse des modèles de transfert de chaleur et de masse développés au LaSIE .....   | 95  |
| III.7   | Modélisation expérimentale de transfert de masse et de chaleur dans les matériaux poreux.....  | 97  |
| III.8   | Modélisation de la pluie et de l'ensoleillement .....  | 100 |
| III.9   | Conclusion .....   | 102 |
| IV      | <b>CHAPITRE IV : CARACTERISATION MECANIQUE, THERMIQUE, HYDRIQUE ET MICROSTRUCTURALE DES ECO BETONS A BASE DE POUDRES DE VERRE ET DE LA FUMEE DE SILICE</b> ..... | 103 |
| IV.1    | Introduction .....   | 103 |
| IV.2    | Programme expérimental.....  | 104 |

|           |   |     |
|-----------|---|-----|
| IV.2.1    | Présentation des matériaux étudiés.....   | 104 |
| IV.2.2    | Formulations des bétons avec un remplacement ciment / poudre de verre .....                     | 107 |
| IV.2.3    | Protocoles utilisés lors de la caractérisation expérimentale .....                              | 108 |
| IV.2.3.1  | Propriétés du béton à l'état frais (Essai de l'ouvrabilité).....                                | 108 |
| IV.2.3.2  | Résistance à la compression.....  | 109 |
| IV.2.3.3  | Porosité accessible à l'eau.....  | 109 |
| IV.2.3.4  | Porosité par intrusion au mercure .....   | 110 |
| IV.2.3.5  | Analyse de la microstructure par Microscope Electronique à Balayage (MEB) .                     | 111 |
| IV.2.3.6  | Analyse thermogravimétrique ATG.....  | 111 |
| IV.2.3.7  | Conductivité thermique.....   | 112 |
| IV.2.3.8  | Chaleur spécifique.....   | 113 |
| IV.2.3.9  | Perméabilité à la vapeur d'eau .....  | 115 |
| IV.2.3.10 | Isothermes de sorption .....  | 116 |
| IV.3      | Résultats et discussion .....   | 117 |
| IV.3.1    | Ouvrabilité.....  | 117 |
| IV.3.2    | Résistance à la compression .....   | 118 |
| IV.3.3    | Porosité accessible à l'eau et par intrusion de mercure .....                                   | 121 |
| IV.3.4    | Analyse de la microstructure par Microscope Electronique à Balayage MEB .....                   | 123 |
| IV.3.5    | Analyse Thermogravimétrique ATG.....  | 126 |
| IV.3.6    | Conductivité thermique .....  | 128 |
| IV.3.7    | Chaleur spécifique .....  | 130 |
| IV.3.8    | Perméabilité à la vapeur d'eau.....   | 131 |
| IV.3.9    | Isotherme de sorption et la capacité hydrique .....   | 132 |
| IV.4      | Conclusion.....   | 134 |
| V.        | CHAPITRE V: MODELISATION EXPERIMENTALE ET NUMERIQUE DE<br>TRANSFERT DE MASSE ET DE CHALEUR..... | 137 |
| V.1       | Introduction .....  | 137 |
| V.2       | La mise en place de la plateforme expérimentale.....  | 138 |
| V.2.1     | Description du banc .....   | 139 |
| V.2.2     | La mise en œuvre de la paroi.....   | 139 |
| V.2.3     | Régulation en Température T et humidité relative HR .....                                       | 141 |
| V.2.4     | Simulateur de pluie.....  | 142 |
| V.2.5     | Simulateur d'ensoleillement.....  | 143 |
| V.2.6     | Autres capteurs et acquisition associée .....   | 144 |
| V.2.7     | Qualification du banc.....  | 146 |
| V.3       | Modèle mathématique de transfert de masse et de chaleur dans les milieux poreux<br>.....        | 149 |
| V.3.1     | Formulation mathématique.....   | 150 |

|   |     |
|---|-----|
| V.3.2 Bilan massique.....   | 150 |
| V.3.3 Bilan énergétique.....  | 152 |
| V.3.4 Les conditions aux limites.....   | 153 |
| V.3.5 Résolution numérique.....   | 153 |
| V.3.6 Paramètres d'entrée du modèle.....  | 154 |
| V.4 Identification des propriétés de transfert hydrique via la méthode inverse..... | 154 |
| V.4.1 Modèle numérique.....   | 154 |
| V.4.2 Matériel et méthodes expérimentales.....                                      | 155 |
| V.4.3 Résolution numérique du problème direct.....                                  | 155 |
| V.4.4 Formulation adimensionnelle.....  | 155 |
| V.4.5 Discrétisation temporelle.....  | 156 |
| V.4.6 Discrétisation spatiale.....  | 157 |
| V.4.7 La procédure de minimisation.....   | 157 |
| V.4.8 Résolution numérique.....   | 159 |
| V.4.9 Effet des paramètres initiaux.....  | 160 |
| V.4.10 Confrontation des résultats de minimisation.....                             | 164 |
| V.5 Essais à l'échelle de la paroi et simulation numérique.....                     | 166 |
| V.5.1 Essai sous sollicitation de type échelon.....                                 | 167 |
| Tableau V- 4 : Coefficients d'échange massique et convectif.....                    | 170 |
| V.5.2 Test de précipitation et radiation.....                                       | 175 |
| V.6 Conclusion.....   | 185 |
| Conclusion générale et perspectives.....  | 187 |

## Liste des figures

### I. CHAPITRE I

|  |    |
|--|----|
| Figure I- 1: Une vue de la microstructure des FGM, Graduation de la microstructure avec des inclusions métallo-céramiques : (i) microstructure à gradient régulier, (ii) vue agrandie et (iii) FGM céramique-métal [10]..... | 9  |
| Figure I- 2 : Vue en coupe transversale d'un échantillon après impact dont la composition du matériau riche en métal a été influencée sur sa surface supérieure (côté riche en céramique)[11] .....                          | 10 |
| Figure I- 3 : (a) Schéma montrant les principes du FDM [17] et (b) de la conception du mécanisme de la triple extrudeuse [18]. (c) Un FGM composé de $Al_2O_3$ et de $ZrO_2$ préparé par FDM [18] .....                      | 11 |
| Figure I- 4 : Schéma illustrant le principe de (a) SLA [17], et (b) FGM, un panneau cellulaire à gradient de porosité réalisé par la technologie SLA [22] .....  | 12 |
| Figure I- 5: La production scientifique reliée aux matériaux FGM [10].....   | 13 |
| Figure I- 6 : Caractéristiques du béton durci en fonction d'une augmentation progressive de la porosité [25] .....   | 14 |
| Figure I- 7 : Schéma représentatif et résultat de la technique de projection graduée [25].....   | 14 |
| Figure I- 8 : Production automatisée d'éléments en béton fonctionnellement gradués ; Photo crédit : ILEK/ISYS/IWB, Université de Stuttgart.....  | 15 |
| Figure I- 9: Géométrie d'une plaque en FGM.....  | 16 |
| Figure I- 10 : Variation de la fraction volumique dans une plaque P-FGM. ....  | 17 |
| Figure I- 11: Variation de la fraction volumique dans une plaque S-FGM. ....   | 18 |
| Figure I- 12: Variation du module de Young dans une plaque E-FGM.....  | 19 |
| Figure I- 13: Représentation d'une plaque de forme géométrique arbitraire. ....  | 20 |
| Figure I- 14: Illustration de la plaque de Love-Kirchhoff [24]. ....   | 21 |
| Figure I- 15: Illustration de la plaque de Reissner-Mindlin [24]. ....   | 23 |
| Figure I- 16 : Illustration de la plaque d'ordre élevé [24]......  | 24 |

### II. CHAPITRE II

|  |    |
|--|----|
| Figure II- 1: Géométrie et coordonnées de la plaque rectangulaire FGM reposant sur une fondation élastique et soumise aux conditions de l'environnement. ....  | 27 |
| Figure II- 2: La flèche maximale $\bar{w}$ adimensionnelle pour différents rapports d'aspect $b/a$ de plaque FG reposant sur des fondations élastiques de type Winkler-Pasternak ( $a/h = 10$ ) .....  | 42 |
| Figure II- 3: La flèche centrale $\bar{w}$ adimensionnelle pour différents rapports d'élancement $a/h$ pour une plaque FG reposant sur des fondations élastiques de type Winkler-Pasternak. ....   | 43 |
| Figure II- 4: Evolution de la contrainte axiale adimensionnelle $\bar{\sigma}_x$ à travers l'épaisseur d'une plaque FG rectangulaire qui repose sur des fondations élastiques pour différentes valeurs d'humidité et de température ( $a/h = 10, b/a = 3, p = 2$ ) .....                       | 44 |
| Figure II- 5: Evolution de la contrainte longitudinale de cisaillement adimensionnelle $\bar{\tau}_{xy}$ à travers l'épaisseur d'une plaque FG rectangulaire reposant sur des fondations élastiques pour différentes valeurs d'humidité et de température ( $a/h = 10, b/a = 3, p = 2$ ) ..... | 44 |

|  |    |
|--|----|
| Figure II- 6: Evolution de la contrainte de cisaillement transversal adimensionnelle $\bar{\tau}_{xz}$ à travers l'épaisseur d'une plaque FG rectangulaire reposant sur des fondations élastiques pour différentes valeurs d'humidité et de températures ( $a/h=10, b/a=3, p=2$ ) .          | 45 |
| Figure II- 7: Flèche maximale adimensionnelle $\bar{w}$ par rapport aux différents rapports d'élancement $a/h$ d'une plaque FG rectangulaire, pour différentes distributions de température et de concentration d'humidité $\bar{\Psi}(z)$ ( $b/a=3, p=2$ )                                  | 46 |
| Figure II- 8: Contrainte axiale adimensionnelle $\bar{\sigma}_x$ par rapport aux différents rapports d'élancement $a/h$ d'une plaque FG rectangulaire, pour différentes distributions de température et de concentration d'humidité $\bar{\Psi}(z)$ ( $b/a=3, p=2$ ) .                       | 46 |
| Figure II- 9: Contrainte longitudinale de cisaillement adimensionnelle $\bar{\tau}_{xy}$ par rapport aux différents rapports d'élancement $a/h$ d'une plaque FG rectangulaire, pour différentes distributions de température et de concentration d'humidité $\bar{\Psi}(z)$ ( $b/a=3, p=2$ ) | 47 |
| Figure II- 10: Contrainte de cisaillement transversal $\bar{\tau}_{xz}$ par rapport aux différents rapports d'élancement $a/h$ d'une plaque FG rectangulaire, pour différentes distributions de température et de concentration d'humidité $\bar{\Psi}(z)$ ( $b/a=3, p=2$ ) .                | 47 |
| Figure II- 11: Flèche maximale adimensionnelle $\bar{w}$ en fonction du rapport d'aspect $b/a$ d'une plaque FG rectangulaire pour différents rapports $E_m/E_c$ ( $a/h=10, p=2$ )  | 48 |
| Figure II- 12: Contrainte axiale adimensionnelle $\bar{\sigma}_x$ en fonction du rapport d'aspect $b/a$ d'une plaque FG rectangulaire pour différents rapports $E_m/E_c$ ( $a/h=10, p=2$ )   | 49 |
| Figure II- 13: Contrainte axiale adimensionnelle $\bar{\sigma}_x$ en fonction du rapport d'aspect $b/a$ d'une plaque FG rectangulaire pour différents rapports $E_m/E_c$ ( $a/h=10, p=2$ )   | 49 |
| Figure II- 14: Contrainte de cisaillement transversale adimensionnelle $\bar{\tau}_{xz}$ en fonction du rapport d'aspect $b/a$ d'une plaque FG rectangulaire pour différents rapports $E_m/E_c$ ( $a/h=10, p=2$ )  | 50 |
| Figure II- 15: Flèche maximale adimensionnelle $\bar{w}$ en fonction du rapport d'aspect $b/a$ d'une plaque FG pour différents rapports $E_m/E_c$ ( $a/h=10, p=2$ )  | 50 |
| Figure II- 16: Contrainte axiale adimensionnelle $\bar{\sigma}_x$ en fonction du rapport d'aspect $b/a$ d'une plaque FG pour différents rapports $E_m/E_c$ ( $a/h=10, p=2$ )   | 51 |
| Figure II- 17: Contrainte longitudinale de cisaillement adimensionnel $\bar{\tau}_{xy}$ en fonction du rapport d'aspect $b/a$ d'une plaque FG pour différents rapports $E_m/E_c$ ( $a/h=10, p=2$ )   | 51 |
| Figure II- 18: Contrainte de cisaillement transversal stress $\bar{\tau}_{xz}$ en fonction du rapport d'aspect $b/a$ d'une plaque FG pour différents rapports $E_m/E_c$ ( $a/h=10, p=2$ )  | 52 |

### CHAPITRE III

|  |    |
|--|----|
| Figure III-1 : Répartition des émissions mondiales par secteur d'activité en 2010 (chiffres clés du climat France et Monde édition 2015, SOeS)[13]           | 54 |
| Figure III-2 : Comparaison de la résistance à la compression à 28 jours entre le béton témoin et le béton de granulats de verre (M. Adaway, et al., 2015)[6] | 55 |
| Figure III-3 : La comparaison de la résistance à la compression à 28 jours de tous les échantillons (Najib N. G et al., 2018)[7]                             | 56 |

|  |     |
|--|-----|
| Figure III-4 : Résistance à la compression de différents mélanges selon le rapport E/L (Ablam Zidol et al., 2017)[12] .....  | 57  |
| Figure III-5 : Représentation d'un milieu poreux (Bennai et al., 2016)[37].....  | 60  |
| Figure III-6 : Évolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau du mortier L30 à 3 mois d'âge [38].....  | 63  |
| Figure III-7 : Conductivité thermique du béton de lin en fonction de la température et de la teneur en eau [39].....   | 64  |
| Figure III-8 : Evolution de la chaleur spécifique en fonction de l'état hydrique du matériau [41] .....  | 65  |
| Figure III-9 : Les trois phases d'un milieu non saturé .....   | 67  |
| Figure III-10 : Banc de saturation .....   | 69  |
| Figure III-11 : Porosimètre à mercure Micrometrics®-Autopore V 9600.....   | 70  |
| Figure III-12 : Distribution de la taille des pores obtenue par intrusion au mercure pour le bois aggloméré, la brique, le parpaing et le plâtre [41] .....  | 72  |
| Figure III-13 : Diagramme de l'hygrométrie en fonction de la température de l'air et la teneur en humidité.....  | 73  |
| Figure III-14 : Couche de molécule adsorbées [45].....   | 73  |
| Figure III-15 : Micromeritics Triflex Micromeritics®-LaSIE-.....   | 75  |
| Figure III-16 : Diagramme schématique d'une courbe d'isotherme d'adsorption et désorption [47] .....   | 77  |
| Figure III-17 : Classification des isothermes d'adsorption (en rouge) et de désorption (en vert). .....  | 78  |
| Figure III-18 : Dispositif gravimétrique de mesure des isothermes de sorption à droite VSA, et à gauche : DVS.....   | 80  |
| Figure III-19 : Dispositif volumétrique de mesure des isothermes de sorption : Belsorp-aqua3 .....   | 81  |
| Figure III-20 : Comparaison des isothermes de sorption à 20°C obtenues par différentes méthodes [51].....  | 81  |
| Figure III-21 : Comparaison des isothermes d'adsorption/désorption obtenues par deux méthodes différentes : gravimétrique et volumétrique [41] .....   | 82  |
| Figure III-22 : Illustration schématique de la tortuosité.....   | 85  |
| Figure III-23 : Dispositif Gintronic-Gravitest et son principe de fonctionnement –LaSIE- ....  | 86  |
| Figure III-24 : Représentation des résistances à la vapeur d'eau introduites dans la méthode de la coupelle .....  | 88  |
| Figure III-25 : Evaluation de la perméabilité à la vapeur d'eau en fonction de la température pour la brique, le parpaing et le bois aggloméré (Ferroukhi Y,2015) [41]. .....                                    | 89  |
| Figure III-26 : Comparaison des isothermes d'adsorption et de désorption de la vapeur d'eau à 20°C à 7 et 28 jours de : (a) pâte de ciment 1, (b) pâte de ciment L30, (c) mortier1 et (d) mortier L30 [38] ..... | 90  |
| Figure III-28 : Schéma de la configuration expérimentale [76].....   | 98  |
| Figure III-29 : Banc expérimental développé par [77].....  | 98  |
| Figure III-30 : Banc expérimental développé par [78].....  | 99  |
| Figure III-31 : Banc expérimental développé par [79].....  | 100 |

### III. CHAPITRE IV

|   |     |
|---|-----|
| Figure IV- 1: Démarche entreprise.....  | 104 |
| Figure IV- 2: Analyse granulométrique des liants utilisés.....  | 106 |
| Figure IV- 3: Images MEB de la CEMI (a), de la CEMV (b), de la fumée de silice (c) et de la poudre de verre (d). .....                | 107 |
| Figure IV- 4: Essai de l'ouvrabilité (Essai de cône d'Abrams) .....   | 109 |
| Figure IV- 5: Banc de saturation [17] .....   | 110 |
| Figure IV- 6: Schéma de la thermogravimétrie.....   | 112 |
| Figure IV- 7: Lambda-meter Ep 5000 <sup>e</sup> –LaSIE .....  | 113 |
| Figure IV- 8: Calorimètre CALVET BT 2.15 –LaSIE- .....  | 114 |
| Figure IV- 9: Les séquences de changement de température du dispositif Calvet BT 2.15 ..  | 115 |
| Figure IV- 10: Dispositif Gintronic Gravitest 6400 .....  | 116 |
| Figure IV- 11: Dispositif ProUmid <sup>®</sup> .....  | 117 |
| Figure IV- 12: L'affaissement des bétons étudiés.....   | 118 |
| Figure IV- 13: La résistance à la compression des bétons étudiés.....   | 120 |
| Figure IV- 14: Effet du ratio de remplacement du GP sur la résistance à la compression à 28 jours du mortier et du béton .....        | 121 |
| Figure IV- 15: La porosité accessible à l'eau et par intrusion de mercure des bétons étudiés .....                                    | 122 |
| Figure IV- 16: Distribution des tailles de pores des bétons étudiés .....   | 123 |
| Figure IV- 17: Images MEB et analyse EDX de PC-I (a), 20G-I (b) et 30G-I (c).....   | 124 |
| Figure IV- 18: Images MEB et analyse EDX de 20G-V (a) and 30G-V (b).....  | 125 |
| Figure IV- 19: Images MEB et analyse EDX de 20GSF-I (a) and 30GSF-I (b).....  | 126 |
| Figure IV- 20: ATG/ dTG des bétons étudiés .....  | 127 |
| Figure IV- 21: La conductivité thermique des bétons étudiés.....  | 128 |
| Figure IV- 22: La conductivité thermique en fonction de la densité des matériaux .....  | 129 |
| Figure IV- 23: L'évolution de la conductivité thermique en fonction de la température de l'échantillon.....                           | 129 |
| Figure IV- 24: La conductivité thermique des éco-bétons en fonction de la densité.....  | 130 |
| Figure IV- 25: La chaleur spécifique des bétons étudiés .....   | 131 |
| Figure IV- 26: La perméabilité à la vapeur d'eau des bétons étudiés [kg/m.s.Pa].....  | 132 |
| Figure IV- 27: Les courbes d'isothermes de sorption-désorption des bétons étudiés.....  | 133 |
| Figure IV- 28: Capacité de stockage de l'humidité des bétons étudiés. ....  | 134 |
| <b>V. CHAPITRE V</b>  |     |
| Figure V- 1 : Banc expérimental développé.....  | 139 |
| Figure V- 2 : Le caisson construit de 1,20m x 1,20m x 1 ,20m.....   | 139 |
| Figure V- 3 : La mise en œuvre de la paroi. (a) le coffrage, (b) le coulage, (c) la paroi après décoffrage.....                       | 140 |
| Figure V- 4 : L'ensemble du banc expérimental.....  | 142 |
| Figure V- 5 : L'installation de simulateur de pluie .....   | 142 |
| Figure V- 6: L'instalation de simulateur du soleil .....  | 143 |
| Figure V- 7 : La disposition des capteurs d'éclairement CLO & GLO (Pyranomètre et Pyrgéomètre) .....                                  | 143 |
| Figure V- 8 : Le capteur AHLBORN FHA 646 R .....  | 144 |
| Figure V- 9: Position des capteurs sur les surfaces et au cœur de la paroi (à gauche surface extérieure, à droite vue en coupe) ..... | 145 |
| Figure V- 10 : Détail du positionnement des capteurs en profil de la paroi (Détail A) .....   | 145 |
| Figure V- 11 : La disposition des capteurs T&HR et Capteurs de flux thermique .....   | 146 |

|  |     |
|--|-----|
| Figure V- 12 : disposition des capteurs dans la cellule .....  | 146 |
| Figure V- 13 : L'évolution de la température dans la salle et à l'intérieur des deux caissons.....                           | 147 |
| Figure V- 14 : Le profil de température au sein de la paroi en régime stationnaire.....                                      | 147 |
| Figure V- 15: Cartographie des flux radiatifs CLO & GLO sur une maille de 5 X 5.....   | 149 |
| Figure V- 16: Le banc expérimental .....   | 155 |
| Figure V- 17 : La procédure entreprise .....   | 158 |
| Figure V- 18 : L'algorithme de minimisation .....  | 159 |
| Figure V- 19 : La capacité de stockage hydrique (Entrés en traits continus, sortis en traits discontinus) .....              | 162 |
|  |     |
| Figure V- 21 : La conductivité de vapeur d'eau (Entrés en traits continus, sortis en traits discontinus) .....               | 163 |
| Figure V- 22: La perméabilité liquide d'eau (a), la perméabilité à la vapeur d'eau (b) et le rapport entre les deux (c)..... | 164 |
| Figure V- 23: Evolution de l'humidité relative au sein du matériau à 2,5 cm de profondeur en fonction du temps .....         | 165 |
| Figure V- 24: Accumulation d'eau absorbée .....  | 166 |
| Figure V- 25: La variation de température et de l'humidité relative dans le caisson A.....                                   | 168 |
| Figure V- 26: La variation de température et de l'humidité relative dans le caisson B.....                                   | 169 |
| Figure V- 27: Évolution de la température sur le bord extérieur .....  | 171 |
| Figure V- 28: Évolution de l'humidité relative sur le bord extérieur.....  | 171 |
| Figure V- 29: Évolution de la température sur le bord intérieur .....  | 172 |
| Figure V- 30: Évolution de l'humidité relative sur le bord intérieur .....   | 172 |
| Figure V- 31: Évolution de la température dans la zone 1 à différentes position x=4, 6 et 9 cm .....                         | 173 |
| Figure V- 32: Évolution de la température dans la zone 2 à différentes position x=5 et 8 cm .....                            | 173 |
| Figure V- 33: Évolution de la température dans la zone 3 à différentes position x= 6 et 10 cm .....                          | 174 |
| Figure V- 34: Évolution de l'humidité relative dans la zone 1 à différentes position x=4, 6 et 9 cm.....                     | 174 |
| Figure V- 35: Évolution de l'humidité relative dans la zone 2 à différentes position x=5 et 8 cm.....                        | 175 |
| Figure V- 36: Évolution de l'humidité relative dans la zone 3 à différentes position x= 6 et 10 cm.....                      | 175 |
| Figure V- 37: Sollicitation de température dans le caisson A.....  | 176 |
| Figure V- 38: Variation de l'humidité relative dans le caisson A.....  | 176 |
| Figure V- 39: Le flux radiation et de pluie infiltrée dans le mur (face extérieure).....                                     | 177 |
| Figure V- 40: Evolution de la température dans le caisson intérieur .....  | 177 |
| Figure V- 41: Evolution de l'humidité relative dans le caisson intérieur .....   | 178 |
| Figure V- 42: Evolution de la température dans le bord extérieur.....  | 179 |
| Figure V- 43: Evolution de l'humidité relative dans le bord extérieur .....  | 179 |
| Figure V- 44: Evolution de la température dans le bord intérieur .....   | 180 |
| Figure V- 45: Evolution de l'humidité relative dans le bord intérieur.....   | 180 |
| Figure V- 46: Evolution de la température dans différentes position x=4, 6 et 9cm .....                                      | 181 |
| Figure V- 47: Evolution de la température dans différentes position x=5 et 8cm .....   | 181 |

|  |     |
|--|-----|
| Figure V- 48: Confrontation du flux thermique au gradient de température au bord extérieur .....   | 182 |
| Figure V- 49: Evolution de l'humidité relative dans différentes position x=4, 6 et 9cm.....  | 182 |
| Figure V- 50: Evolution de l'humidité relative dans différentes position x=5 et 8cm.....   | 183 |
| Figure V- 51: Confrontation du flux thermique conduit du modèle de prédiction au flux thermique conduit expérimental au bord extérieur.....  | 184 |
| Figure V- 52: Confrontation du flux thermique conduit du modèle de prédiction au flux thermique conduit expérimental au bord intérieur ..... | 185 |

## Liste des tableaux

### I. CHAPITRE I

Tableau I- 1: Comparaison entre les propriétés de la céramique et du métal. .... 8

### II. CHAPITRE II

Tableau II- 1: Propriétés des matériaux utilisées dans la plaque FG. .... 35

Tableau II- 2: Effets de la variation de la fraction volumique sur les déplacements et les contraintes adimensionnels d'une plaque FGM carrée ( $a/h = 10$ ,  $b = a = 1$ ,  $K_w = K_p = 0$ ,  $q_0 = 1$ ,  $T = C = 0$ ) ..... 36

Tableau II- 3: Propriétés des matériaux utilisées dans la plaque FG. .... 37

Tableau II- 4: Effets de la variation de la fraction volumique et des paramètres de fondation élastique sur les déplacements et les contraintes adimensionnels d'une plaque FGM rectangulaire ( $a/h = 10$ ,  $b = 3a$ ,  $q_0 = 100$ ,  $t_1 = t_3 = 0$ ,  $t_2 = 10$ ,  $c_1 = c_3 = 0$ ,  $c_2 = 100$ ). ..... 38

Tableau II- 5: Effets de la variation de la fraction volumique et des paramètres de fondation élastique sur les déplacements et les contraintes adimensionnels d'une plaque FGM rectangulaire ( $a/h = 10$ ,  $b = 3a$ ,  $q_0 = 100$ ,  $t_1 = 0$ ,  $t_2 = t_3 = 10$ ,  $c_1 = 0$ ,  $c_2 = c_3 = 100$ ) ..... 40

Tableau II- 6: Effet du rapport d'élanement des paramètres de fondation élastique sur la déflexion adimensionnelle d'une plaque FGM carrée ( $q_0 = 100$ ,  $t_1 = 0$ ,  $t_2 = t_3 = 10$ ,  $c_1 = 0$ ,  $c_2 = c_3 = 100$ ) ..... 41

### III. CHAPITRE III

Tableau III-1 : Formulations des béton (Najib N. G et al., 2018)[7] ..... 56

Tableau III-2 : Résultats des essais de conductivité thermique sur des matériaux à un âge  $\geq 28$  jours [38]. ..... 62

Tableau III-3 : Conductivités thermiques en fonction de la température de lin (Thèse Rahim. M, 2015)[39] ..... 63

Tableau III-4 : Synthèse des modèles de prédiction développés au LaSIE...... 96

### IV. CHAPITRE IV

Tableau IV- 1:  $d_{\max}$ , densité et surface spécifique des ciments, fumée de silice et de la poudre de verre ..... 105

Tableau IV- 2: Composition élémentaire des liants utilisés (% wt)..... 107

Tableau IV- 3: Mélanges des bétons étudiés ( $\text{kg/m}^3$ ) ..... 108

|  |     |
|--|-----|
| Tableau V- 1: Les caractéristiques techniques des capteurs hygrothermiques AHLBORN FHA 646 R ..... | 144 |
|--|-----|

|  |     |
|--|-----|
| Tableau V- 2 : les propriétés du matériau étudié ..... | 154 |
|--|-----|

|  |     |
|--|-----|
| Tableau V- 3 : Paramètres donnés à priori sélectionnés et paramètres de modèle d'humidification identifiés (sortie)..... | 161 |
|--|-----|

|   |     |
|---|-----|
| Tableau V- 4 : Coefficients d'échange massique et convectif ..... | 170 |
|---|-----|

## V. CHAPITRE V

|  |     |
|--|-----|
| Tableau V- 1: Les caractéristiques techniques des capteurs hygrothermiques AHLBORN FHA 646 R ..... | 144 |
|--|-----|

|  |     |
|--|-----|
| Tableau V- 2 : les propriétés du matériau étudié ..... | 154 |
|--|-----|

|  |     |
|--|-----|
| Tableau V- 3 : Paramètres donnés à priori sélectionnés et paramètres de modèle d'humidification identifiés (sortie)..... | 161 |
|--|-----|

|   |     |
|---|-----|
| Tableau V- 4 : Coefficients d'échange massique et convectif ..... | 170 |
|---|-----|

# **CHAPITRE I. GENERALITES SUR LES MATERIAUX A GRADIENT DE PROPRIETES**

## I.1 Introduction

Un matériau composite est constitué d'un assemblage de deux matériaux ou plus de nature différente qui permet d'augmenter les performances exigées. Cependant, la discontinuité des propriétés matérielles, à travers l'interface des constituants du matériau composite, provoque des concentrations de contraintes sous des chargements mécaniques et thermiques, spécialement dans un environnement thermique ultra-chaud, la différence relative du coefficient d'expansion thermique provoque des contraintes résiduelles importantes. A cet effet, le concept du matériau à gradient des propriétés (Functionally Graded Materials « FGM ») est introduit pour satisfaire la demande dans un environnement ultra haute température et aussi pour éliminer les contraintes singulières.

Le matériau à gradients de propriétés a été découvert par une équipe de chercheurs japonais à la fin des années 80. Ces derniers possèdent des propriétés mécaniques qui varient lentement et de façon continue dans l'une des directions de la structure [1] et ce, pour surmonter le problème existant chez les structures multicouches classiques où des couches homogènes qui sont collées les unes aux autres pour améliorer les performances (mécaniques, thermiques, acoustique,...) des structures en plaques renforcées par des matériaux composites. Ceci provoque la création des concentrations de contraintes au niveau des interfaces entre les couches qui peuvent conduire aux délaminages, à des fissures, et à d'autres mécanismes d'endommagement en raison du changement brutal des propriétés mécaniques et thermiques d'une couche à l'autre.

Les matériaux à gradients de propriétés (FGM) ont été développés pour leurs excellentes propriétés mécaniques et thermiques. Ces matériaux ont de grandes performances et sont capables de résister à des températures ultra-hautes. Les FGM sont perçus au microscope comme des matériaux composites non homogènes. Ces matériaux sont généralement conçus à partir d'un mélange de métaux et de céramique. L'avantage de ces matériaux est leurs résistances aux hautes températures tout en maintenant leurs propriétés structurelles. De plus, les FGM possèdent aussi des propriétés qui changent graduellement et sans interruption afin de réaliser une fonction désirée. Un FGM typique, avec un effet élevé de couplage flexion-membrane, est un composite homogène fabriqué à partir de différentes phases de composants de matériaux (le plus souvent en céramique et métal). La composition change d'une surface en céramique à une surface en métal avec une variation voulue de la fraction volumique des deux matériaux entre les deux surfaces.

Depuis l'apparition des FGM, des investigations ont été entreprises pour développer des matériaux à haute résistance basée sur les matériaux à gradient fonctionnel [2][3]. Ces matériaux ont été initialement conçus comme des matériaux agissant comme barrière thermique pour les structures aérospatiales et les réacteurs de fusion [4][5][6]. Ils sont maintenant développés pour un usage général en tant que composants structuraux dans un environnement de haute température dans le domaine militaire, automobile, biomédical, l'industrie de semi-conducteur et toutes utilisations dans un environnement à hautes températures [7].

Ces types de matériaux, ont suscité beaucoup d'attention récemment en raison des avantages qu'ils possèdent. En effet ces derniers diminuent la disparité dans les propriétés matérielles et de réduisent les contraintes thermiques [8]. La variation continue des propriétés mécaniques confère au matériau un comportement optimisé.

La plupart des « FGM » sont composés de céramiques et de métaux dont les propriétés mécaniques sont comparées dans le Tableau I- 1.

|   |                 |  |
|---|-----------------|--|
| La face à haute température   | Céramique       | - Bonne résistance thermique ;<br>- Bonne résistance à l'oxydation ;<br>- Faible conductivité thermique. |
| Continuité du matériau d'un point à l'autre<br>« couches intermédiaires » | Céramique-métal | -Élimination des problèmes de l'interface ;<br>-Relaxer les contraintes thermiques.                      |
| La face à basse température   | Métal           | - Bonne résistance mécanique ;<br>- Conductivité thermique élevée,<br>- Très bonne ténacité.             |

Tableau I- 1: Comparaison entre les propriétés de la céramique et du métal.

## I.2 Concept des matériaux à gradient de propriétés

Les matériaux à gradient de propriété (FGM) se définissent par leurs capacités à résister à une température de surface de 2000 K et à une variation de température de 1000 K à travers une section inférieure à 10 mm. Les changements continus de la composition, la microstructure, et la porosité de ces matériaux résultent des changements de propriétés, plus précisément les propriétés mécaniques et la conductivité thermique.

Le matériau à gradient de propriétés (FGM) représente un des derniers développements du 21<sup>ème</sup> siècle. Le concept de FGM s'est fait remarquer non seulement dans la conception pratique des matériaux réfractaires mais également dans le développement de divers matériaux graduels, pour lesquels la fraction volumique des fibres des constituants change sans interruption en fonction de la position le long d'une direction. Ce matériau présente

l'avantage d'éviter la concentration des contraintes d'interfaces se développant dans les matériaux composites conventionnels. La composition et la microstructure changent dans l'espace suivant une loi de distribution prédéfinie. Cela est dû au fait que les constituants céramiques des FGM sont capables de résister à des environnements à haute température en raison de leurs meilleures caractéristiques de résistance thermique. De plus, les constituants métalliques fournissent des performances mécaniques plus élevées et réduisent la possibilité de fracture catastrophique. Une microstructure graduée en continu avec des constituants métalliques/céramiques est représentée sur la Figure I- 1. Récemment, [9][10][11] ont présenté une revue des principaux développements des FGM, notamment le transfert de chaleur, les contraintes, les instabilités ainsi que les analyses dynamiques vibratoires, la fabrication et la conception comme montré sur la Figure I- 2. Ces matériaux composites offrent de nombreux bénéfices aux propriétés, comme une résistance importante et une rigidité élevée. Actuellement, aucun matériau industriel n'est capable de résister à de tels chargements thermomécaniques.

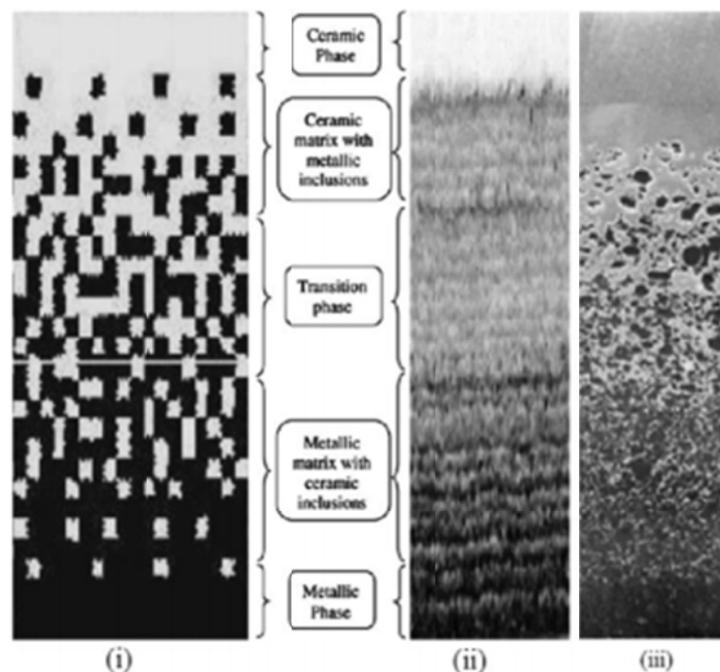


Figure I- 1: Une vue de la microstructure des FGM, Graduation de la microstructure avec des inclusions métallo-céramiques : (i) microstructure à gradient régulier, (ii) vue agrandie et (iii) FGM céramique-métal [10].

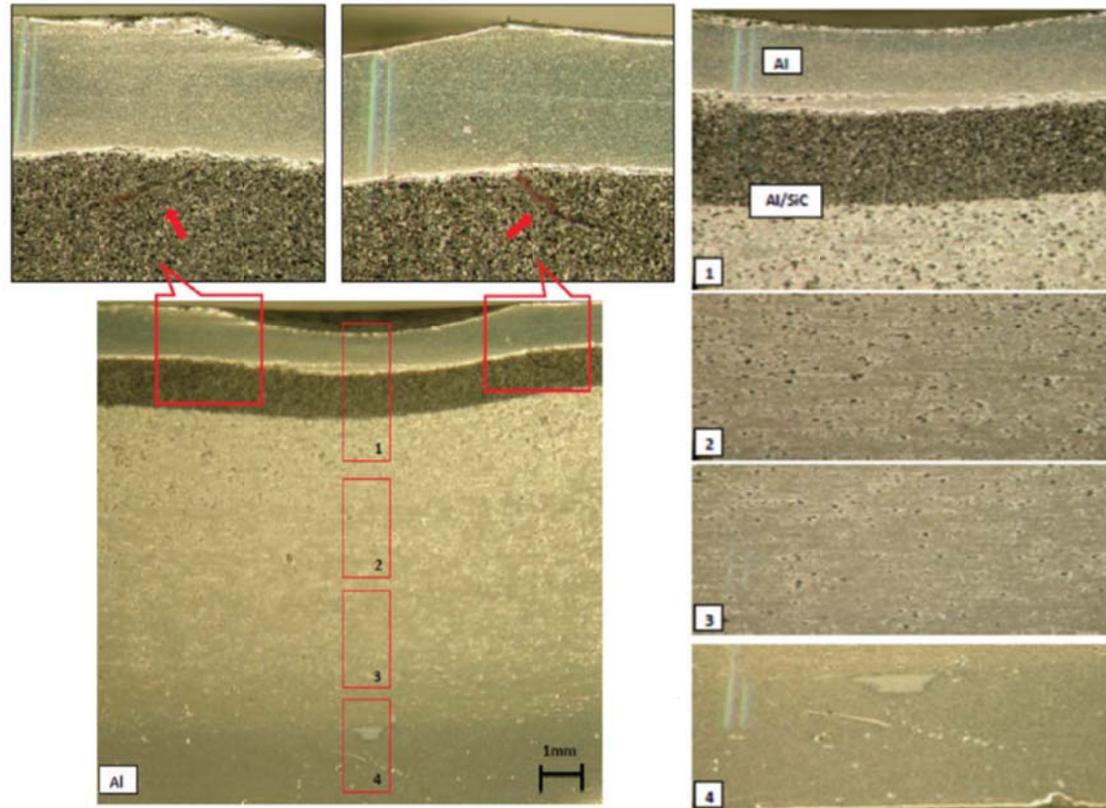


Figure I- 2 : Vue en coupe transversale d'un échantillon après impact dont la composition du matériau riche en métal a été influencée sur sa surface supérieure (côté riche en céramique)[11]

### I.3 Fabrication des FGM

Dans l'industrie, le processus principal utilisé pour l'élaboration des matériaux FGM est la conception des dépôts par fusion (Fused deposition modelling FDM). Le principe du procédé FDM illustré à La Figure I- 3a peut être décrit comme suit : un matériau filamenteux est fondu et déposé sélectivement par un ordinateur tridimensionnel commandé par projection, formant une couche de section transversale prédéfinie et refroidie rapidement ; ensuite, la couche déposée tombe d'une hauteur de couche et la couche suivante est déposée jusqu'à ce que la pièce entière soit fabriquée [12][13]. Comme le montre La Figure I- 3b, Leu et al.[14] ont développé une méthode de triple extrusion pour contrôler le gradient de composition nécessaire à l'extrusion de la pâte. Une pièce en calcaire ( $\text{CaCO}_3$ ) avec une couleur graduée peut être fabriquée en utilisant le FDM, comme le montre La Figure I- 3c. Une pièce verte avec une composition graduée d'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) et de zircon ( $\text{ZrO}_2$ ) a également été fabriquée. Dans un travail connexe de Singh et al [15], des FGM Al/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  ont été préparées en utilisant une méthode qui combine le FDM avec la coulée à investissement (CI). Le procédé FDM est une technologie de production d'additifs (Additive Manufacturing AM) populaire qui offre des avantages de prototypage et qui est largement utilisée. La FDM est une

méthode AM moins coûteuse qui utilise des matériaux moins onéreux et qui ne présente aucun risque de gaz toxiques et de contamination chimique. Cependant, après l'impression FDM, la surface est rugueuse, d'autres étapes sont donc nécessaires. La plus grande précision possible à ce jour n'est que de 0,1 mm [15]. En raison du mouvement mécanique de la buse, une table d'appui est également nécessaire à cause de la faible vitesse d'injection[16].

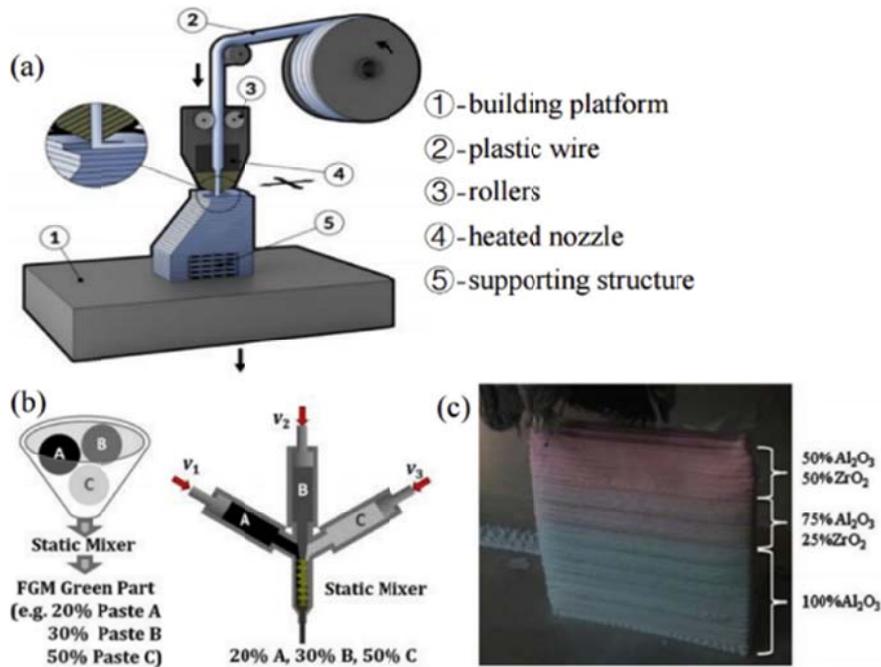


Figure I- 3 : (a) Schéma montrant les principes du FDM [17] et (b) de la conception du mécanisme de la triple extrudeuse [18]. (c) Un FGM composé de  $Al_2O_3$  et de  $ZrO_2$  préparé par FDM [18]

En outre, la stéréolithographie (SLA) est la première technologie pratique de prototypage rapide. Cette dernière a été largement utilisée dans divers secteurs industriels tels que l'aviation, l'automobile, les appareils électriques, les biens de consommation, les dispositifs médicaux, pour n'en citer que quelques-uns, en partie grâce à sa capacité à assurer l'automatisation des processus combinée à une bonne qualité de surface et une précision dimensionnelle. Le principe du SLA peut être décrit comme suit [19][20][21] : un laser avec une longueur d'onde spécifique (par exemple, 250-300 nm) est focalisé sur un point de la surface d'un matériau photodurcissable (par exemple une résine photosensible liquide) pour favoriser la polymérisation, puis déplacé vers un autre point suivant une séquence prédéterminée. Cette opération est répétée jusqu'à ce que la polymérisation soit terminée sur une couche ; ensuite la pièce est soulevée verticalement de la hauteur pré-réglée, et l'opération susmentionnée est répétée jusqu'à ce que la pièce entière soit fabriquée, comme le montre la Figure I- 4a. Le SLA a été largement utilisé pour élaborer les FGM. Par exemple, Liu et al.

[22] ont utilisé l'optimisation de la topologie et le procédé de SLA pour produire des matériaux poreux de FGM, comme le montre La Figure I- 4b. Dans des travaux connexes, Gonzalez et al. [23] ont aussi utilisé le SLA pour préparer une structure FG symétrique contenant une enveloppe extérieure dense et un noyau central osseux poreux. Dans la structure FG, le changement de gradient des fractions volumiques de l'alumine et du polymère permet d'obtenir les caractéristiques fonctionnelles de l'enveloppe extérieure et du noyau central.

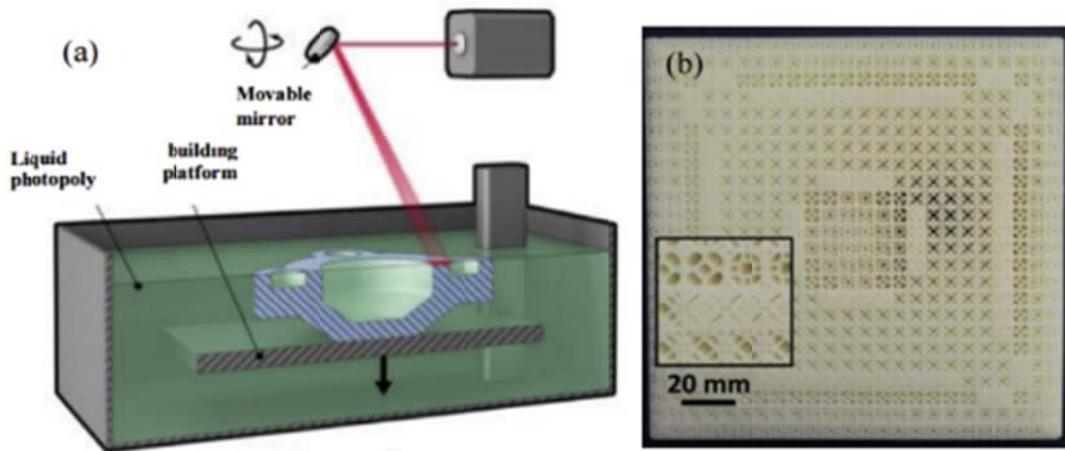


Figure I- 4 : Schéma illustrant le principe de (a) SLA [17], et (b) FGM, un panneau cellulaire à gradient de porosité réalisé par la technologie SLA [22]

L'étude des structures composites est l'un des domaines de recherche les plus prometteurs des dernières décennies. La Figure I- 5 représente le nombre d'investigation entreprises liées aux FGM rapportées dans la littérature. Des analyses structurelles et dynamiques précises sont nécessaires pour concevoir diverses parties structurelles des constructions aérospatiales, mécaniques, navales et civiles afin de comprendre le comportement et la réponse structurelle en temps réel. Différents modèles ont été développés par les chercheurs pour analyser les structures composites. Les théories de déformation en cisaillement sont une catégorisation bien connue des théories des poutres et plaques tout comme la théorie classique. Les composantes transversales de la contrainte de cisaillement sont négligées dans la théorie classique des poutres et plaques [24], tandis qu'elles sont incluses dans les théories de déformation de cisaillement [10].

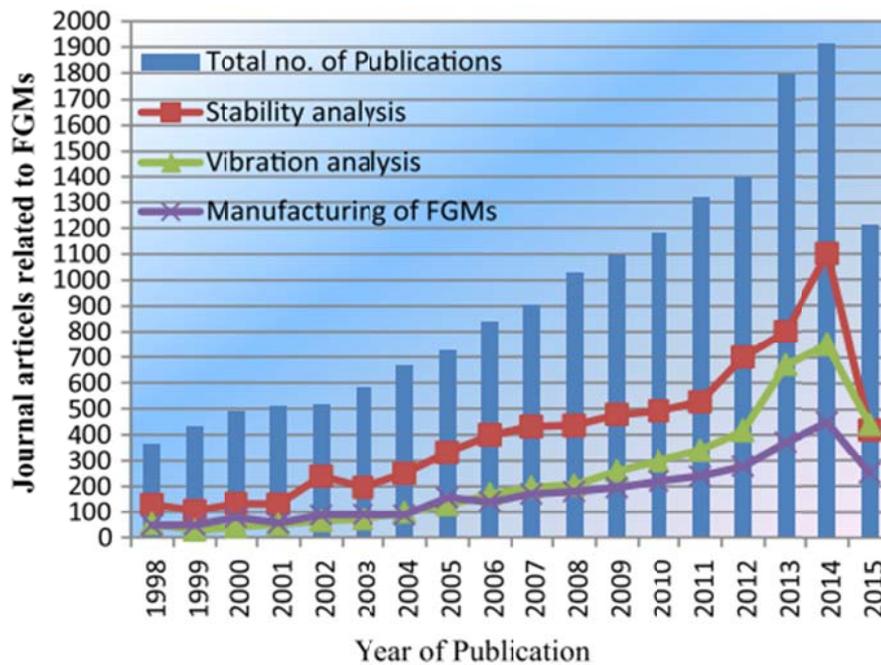


Figure I- 5: La production scientifique reliée aux matériaux FGM [10]

Le concept des matériaux à gradient de propriétés a de l'intérêt non seulement dans la conception des matériaux réfractaires performants pour des utilisations pour les futures navettes spatiales, mais également dans le développement de divers matériaux fonctionnels, tels que les matériaux optiques et électroniques. A cet effet, un deuxième projet a été lancé pour la recherche et le développement de matériaux FGM fonctionnels et adaptatifs « Recherche sur les matériaux de conservation d'énergie avec la structure à gradient de propriétés ». Ce programme vise à appliquer la technologie des FGM dans le but d'améliorer l'efficacité de la conservation d'énergie solaire, nucléaire, photovoltaïque et thermoélectrique.

#### I.4 Les FGM dans le génie civil

La graduation fonctionnelle des éléments en béton permet d'aligner la composition interne des composants structurels avec les exigences performancielles structurelles et thermiques spécifiques. Cet alignement est rendu possible en modifiant continuellement les caractéristiques du matériau, notamment sa porosité, sa résistance ou sa rigidité. Le changement graduel des composants en béton permet l'altération continue des propriétés du béton dans toutes les dimensions spatiales. Minimiser la porosité améliore les caractéristiques structurelles du composant, tandis que la maximisation de la porosité optimise ses propriétés d'isolation thermique et son poids propre (cf. Figure 6).

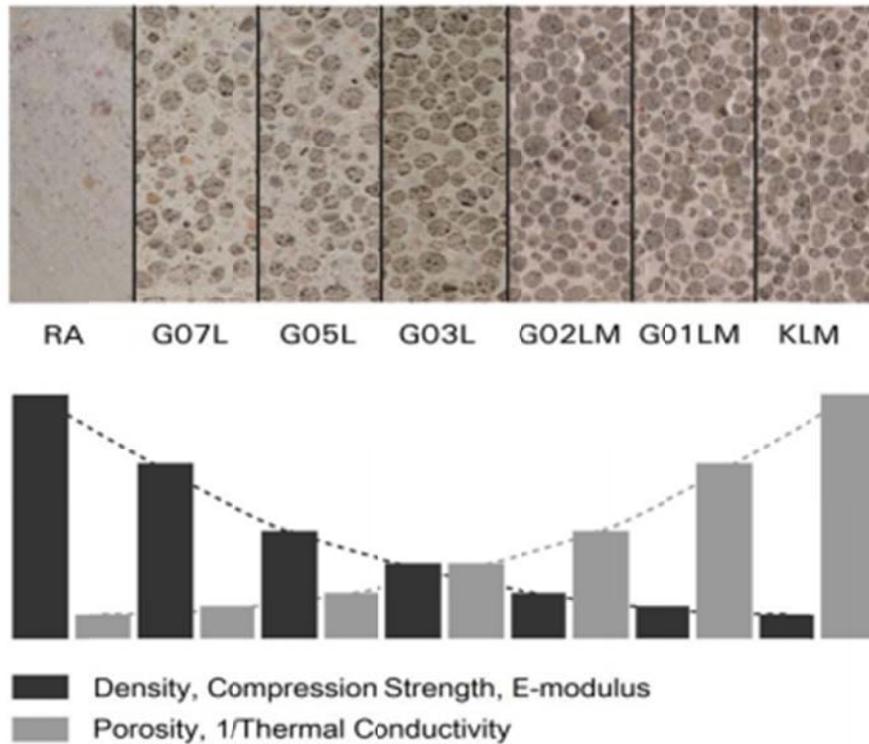


Figure I- 6 : Caractéristiques du béton durci en fonction d'une augmentation progressive de la porosité [25]

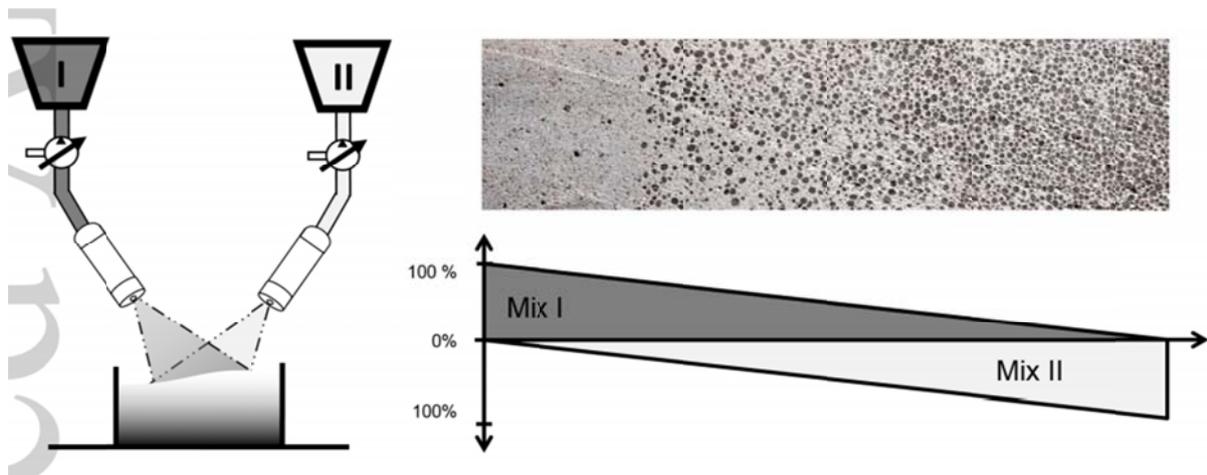


Figure I- 7 : Schéma représentatif et résultat de la technique de projection graduée [25]

Parmi les méthodes d'élaboration des bétons FG, il y a la méthode de projection qui est particulièrement bien adaptée à la production d'éléments en béton fonctionnellement gradué comme montré sur la figure I-7. Par rapport au coulage en couches, la technique de projection présente un certain nombre d'avantages. Alors que l'introduction de l'énergie de compactage dans les éléments en béton coulé calibré peut éliminer la graduation contrôlée précédemment définie (c'est pourquoi aucune étape de compactage n'est effectuée), la technique de projection pour produire des éléments calibrés compactant le béton lors de l'impact. L'application du matériau en couches minces permet une résolution fine et la mise en place du béton sur des

coffrages courbes. Cependant, ce processus peut être automatisé et mis en œuvre à la fois à l'usine de préfabrication et sur le chantier (moyennant la robotique à grande échelle dans ce dernier cas). Le projet de recherche "Matériaux gradués fonctionnellement en ingénierie de la construction" comprenait le développement d'une technique de pulvérisation graduée (cf. Figure I- 8) qui utilise deux mélanges de béton homogènes et pompables. La graduation est établie dans la tête de pulvérisation par l'ajout d'air comprimé.



Figure I- 8 : Production automatisée d'éléments en béton fonctionnellement gradués ; Photo crédit : ILEK/ISYS/IWB, Université de Stuttgart

### **I.5 Lois régissant la variation des propriétés matérielles des plaques FGM**

Les matériaux à gradient de propriétés « FGM » peuvent être produit en changeant, sans interruption, les constituants des matériaux multiphasés dans un profil prédéterminé. Les dispositifs les plus distincts d'un FGM sont les microstructures avec des macros -propriétés graduées de manière continue. Un FGM peut être défini par la variation des fractions de volume. La plupart des chercheurs utilisent la fonction de loi de puissance, la fonction exponentielle, ou la fonction sigmoïde pour décrire les fractions de volume. Les liaisons entre les particules doivent être assez solides pour d'une part, résister à la rupture, et d'autre part empêcher l'usure.

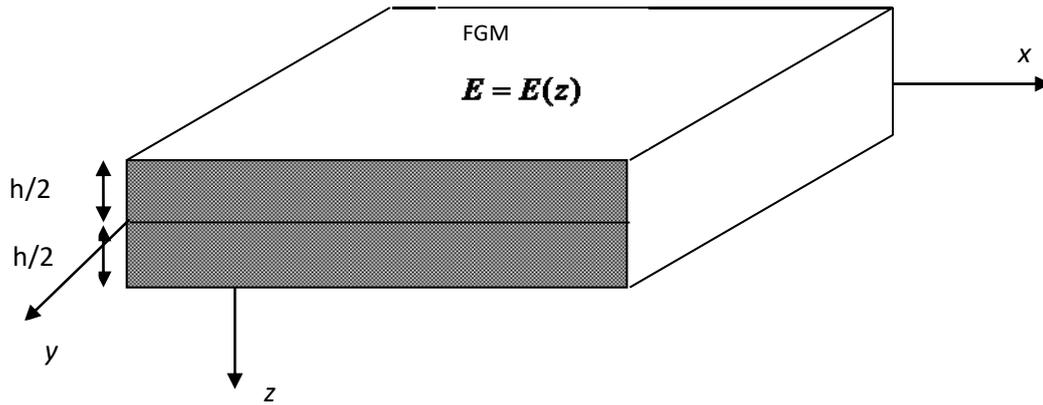


Figure I- 9: Géométrie d'une plaque en FGM.

Les coordonnées  $x$  et  $y$  définissent le plan de la plaque, tandis que l'axe  $z$ , perpendiculaire à la surface moyenne de la plaque est dans la direction de l'épaisseur (cf. Figure I- 9).

Les propriétés du matériau dont le module de Young et le coefficient de Poisson sur les surfaces supérieures et inférieures sont différentes mais sont déterminés selon les demandes d'exécution.

Toutefois le module de Young et le coefficient de Poisson varie de façon continue, dans le sens de l'épaisseur (l'axe  $z$ ) soit :  $E = E(z)$ ,  $\nu = \nu(z)$ . Le module de Young dans le sens de l'épaisseur de la plaque FGM varie soit en fonction de la loi de puissance (P-FGM), soit selon la fonction exponentielle (E-FGM) ou bien selon la fonction sigmoïde (S-FGM).

### I.5.1 Propriétés matérielles de la plaque P-FGM :

La fraction volumique de la classe P-FGM obéit à une fonction basée sur la loi de puissance.

$$V(z) = \left( \frac{z + h/2}{h} \right)^p$$

Où  $p$  est un paramètre matériel et  $h$  est l'épaisseur de la plaque et  $z$  est la coordonnée cartésienne.

Une fois la fraction volumique locale  $\nu(z)$  définie, les propriétés matérielles d'une plaque P-FGM peuvent être déterminées par la loi des mélanges [26]:

$$E(z) = E_m + (E_c - E_m)V(z)$$

Où  $E_m$  et  $E_c$  sont respectivement les modules de Young de la surface inférieure ( $z = -h/2$ ) et supérieure ( $z = h/2$ ) de la plaque FGM. La variation du module de Young dans la direction d'épaisseur de la plaque P-FGM est représentée sur La Figure I- 10, sur laquelle il apparaît clairement que la fraction volumique diminue rapidement près de la surface inférieure pour  $p < 1$ , et augmente rapidement près de la surface supérieure pour  $p > 1$ .

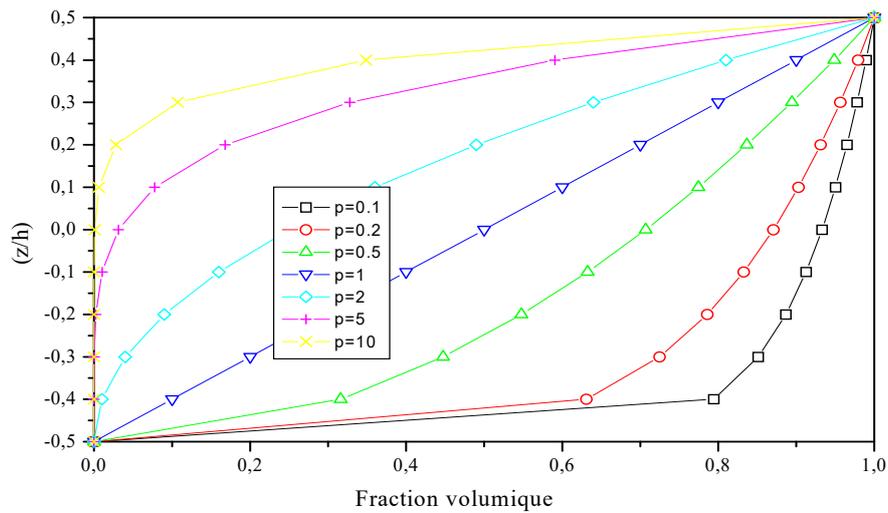


Figure I- 10 : Variation de la fraction volumique dans une plaque P-FGM.

### I.5.2 Propriétés matérielles de la plaque S-FGM

Dans le cas d'une plaque P-FGM, l'application d'une fonction de loi de puissance à une plaque composite multicouche, fait apparaître les concentrations de contraintes sur l'interface du matériau. Néanmoins, ces contraintes peuvent varier brusquement selon la direction ce qui peut causer une rupture de la plaque. [26]. Par conséquent, Chung et chi [27] ont défini la fraction de volume de la plaque FGM en utilisant deux fonctions de la loi de puissance pour assurer une bonne distribution des contraintes parmi toutes les interfaces.

Les deux fonctions de loi de puissance sont définies par :

$$V_1(z) = \frac{1}{2} \left( \frac{h/2 + z}{h/2} \right)^p \text{ Pour } -h/2 \leq z \leq 0$$

$$V_2(z) = 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{h/2 - z}{h/2} \right)^p \text{ Pour } 0 \leq z \leq h/2$$

Appliquant la loi des mélanges, le module de Young de la plaque S-FGM peut être défini par :

$$E(z) = V_1(z) E_1 + [1 - V_1(z)] E_2 \text{ Pour } -h/2 \leq z \leq 0 \text{ (a)}$$

$$E(z) = V_2(z) E_1 + [1 - V_2(z)] E_2 \text{ Pour } 0 \leq z \leq h/2 \text{ (b)}$$

La Figure I- 11 montre que la variation de la fraction volumique dans les équations (a) et (b) représente les distributions sigmoïdes, d'où vient l'appellation de cette plaque FGM(Plaque S-FGM).

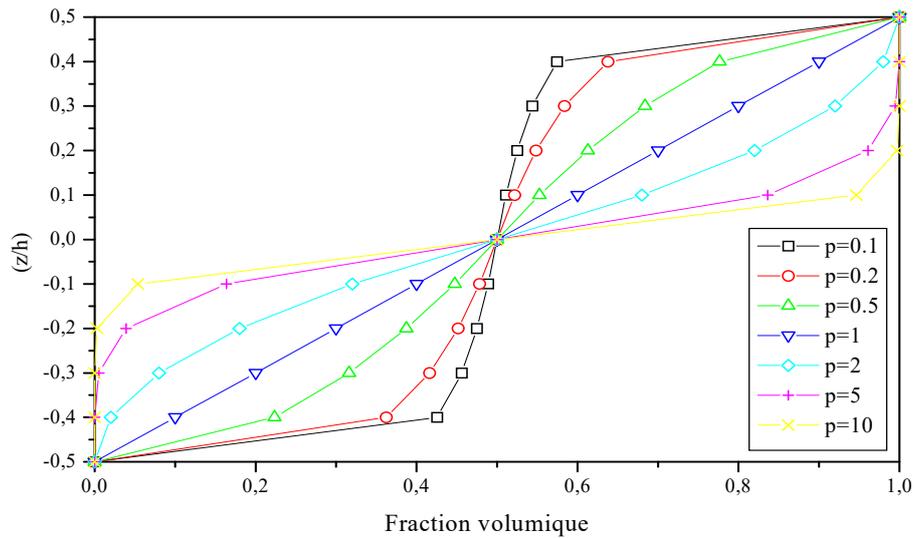


Figure I- 11: Variation de la fraction volumique dans une plaque S-FGM.

### I.5.3 Propriétés matérielles de la poutre E-FGM :

Pour décrire les propriétés matérielles des matériaux FGM, la plupart des chercheurs utilisent la fonction exponentielle qui s'écrit sous la forme, [28] :

$$E(z) = E_2 e^{B(z+h/2)}$$

Avec

$$B = \frac{1}{h} \ln\left(\frac{E_1}{E_2}\right)$$

La variation du module de Young à travers l'épaisseur de la plaque E-FGM est représentée sur la Figure I- 12.

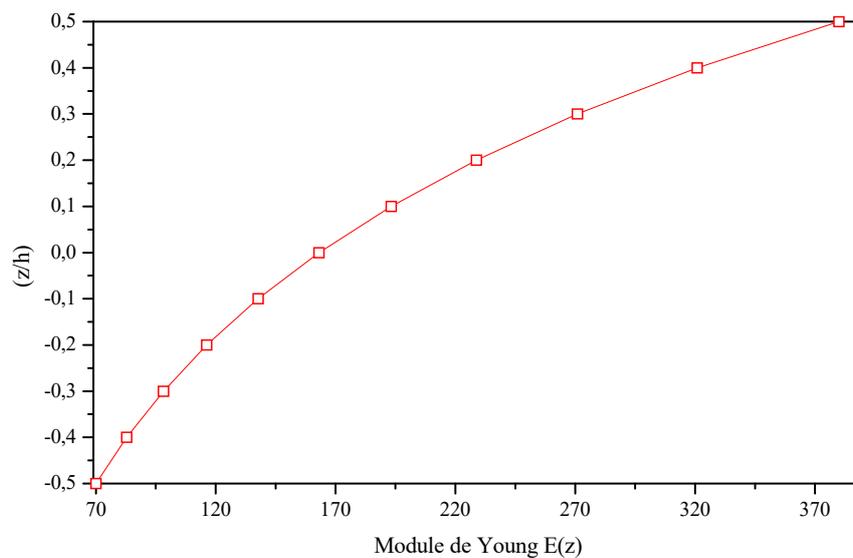


Figure I- 12: Variation du module de Young dans une plaque E-FGM.

## I.6 Théorie des poutres et plaques

L'emploi de structures minces, poutres, plaques et coques, est aujourd'hui largement répandu dans de nombreux domaines, en particulier les transports et le génie civil. C'est pour cela que la théorie des poutres et plaques a été développée dans le but de mieux prédimensionner ainsi que de prédire plus précisément le comportement des structures sous certaines sollicitations en vue de contrôler ou d'éviter divers phénomènes (endommagement, instabilité, ...). En ingénierie ou dans les anciennes recherches, la plupart des modèles utilisés sont en général basés sur la théorie classique (Résistance des Matériaux) et fournissent une approximation imprécise et surestimée qui a pour conséquence un coût des matériaux plus important. De plus, l'hypothèse des comportements linéaires a un domaine de validité restreint. C'est pourquoi, les investigations basées sur ce modèle ont été abandonnées.

Commençons par définir une plaque. Une plaque est un solide délimité par deux plans parallèles, pour lesquelles deux dimensions sont très prépondérantes par rapport à la troisième (cf. Figure I- 13). Elle est caractérisée par :

- un plan moyen, ou plan médian : plan situé à équidistance entre les faces (c'est l'équivalent de la courbe moyenne des poutres) ;
- un feuillet neutre : élément de matière d'épaisseur infinitésimale situé autour du plan moyen (c'est l'équivalent de la fibre neutre des poutres) ; c'est le plan  $(O, x, y)$ , d'équation  $z = 0$  ;
- une fibre normale : ensemble des points situés sur une normale au plan médian, à un endroit  $(x, y)$  donné ; elle a pour direction  $z$ .

On appelle  $h$  l'épaisseur de la plaque ; le plan inférieur est donc le plan  $z = -h/2$  et le plan supérieur est le plan  $z = h/2$ .

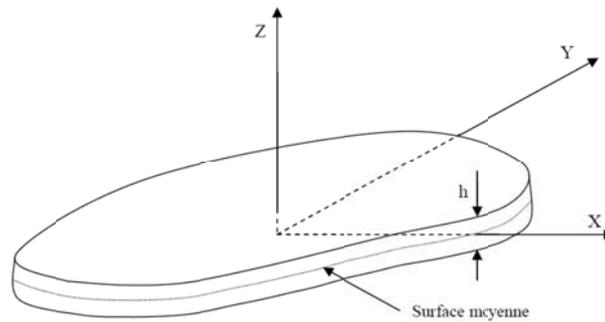


Figure I- 13: Représentation d'une plaque de forme géométrique arbitraire.

## I.7 Les modèles mathématiques des plaques FGM

### I.7.1 La théorie classique des plaques minces de Love-Kirchhoff (CPT)

La théorie des plaques minces, ou théorie de Love-Kirchhoff s'inspire de celle des poutres minces d'Euler-Bernoulli [29][24]. Les hypothèses cinématiques adoptées pour les plaques minces par Kirchhoff généralisent à deux dimensions celles adoptées pour les poutres sans déformation à l'effort tranchant (cf. Figure I- 14). Dans le cas d'une plaque homogène isotrope, la part de cisaillement dans la flèche est directement liée à l'élancement ( $L/h$ ). Elle suppose les hypothèses ci-dessous :

1. La plaque possède une faible épaisseur devant les autres dimensions. Elle possède aussi un plan moyen appelé plan neutre.
2. Les sections droites, initialement normales au plan neutre, restent planes et normales même après déformation. La déformation en cisaillement transverse est donc négligée ( $\varepsilon_z = \gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0$ ). On admet dans ce cas que **la déformation due à l'effort tranchant est nulle** et ne participe pas à la rigidité.
3. Le plan neutre ne subit pas de déformation dans son plan ; on ne considère que le déplacement transversal  $w$  des points du plan neutre ;
4. Vu que l'épaisseur est faible ; en conséquence, les contraintes dans le sens de l'épaisseur sont supposées nulles ( $\sigma_z = 0$ ) ;

Le champ de déplacement s'écrit pour la théorie classique des plaques sous la forme :

$$\begin{aligned}
 u(x, y, z) &= u_0(x, y) - z \frac{\partial w_0}{\partial x}, \\
 v(x, y, z) &= v_0(x, y) - z \frac{\partial w_0}{\partial y}, \\
 w(x, y, z) &= w_0(x, y),
 \end{aligned}$$

Avec  $(u_0, v_0, w_0)$ , les composantes du champ de déplacement sur le plan moyen de la plaque ( $z=0$ ).

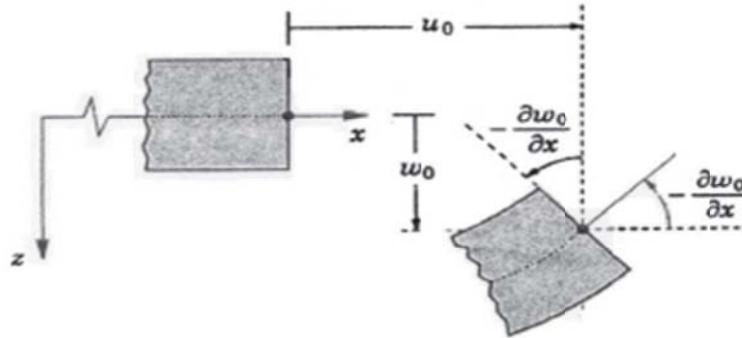


Figure I- 14: Illustration de la plaque de Love-Kirchhoff [24].

Puisque ce modèle ne prend pas en compte l'effet de cisaillement transverse, il donne des résultats imprécis pour les plaques épaisses.

### I.7.2 La théorie de déformation en cisaillement du premier ordre (FSDT)

Dans la théorie classique des plaques, les hypothèses suivantes ont été établies par (Kirchhoff 1850)[29][24] :

1. Aucune déformation ne se produit dans le plan moyen de la plaque ;
2. La contrainte normale  $\sigma_z$  est négligeable devant les autres composantes ;
3. Une normale au plan moyen avant déformation reste normale au plan moyen après déformation ;
4. L'effet de l'inertie de rotation est négligeable.

La troisième hypothèse explique que la déformation due au cisaillement transversal est négligée. Les effets du cisaillement transversal et de l'inertie de rotation deviennent importants lorsque la plaque est relativement épaisse ou lorsque des solutions précises pour des modes plus élevés de vibration sont désirées. Wittrick et al.,1987 [30] a précisé qu'en excluant ces effets, l'erreur dans la théorie de plaque de Kirchhoff est proportionnelle à l'épaisseur. Si la théorie de plaque de Kirchhoff est employée, les fréquences obtenues sont supérieures à celles prévues. Une théorie plus rigoureuse de plaque est ainsi nécessaire pour l'analyse des plaques épaisses. Il y a eu beaucoup de théories de plaques épaisses prenant en

compte l'effet de cisaillement transversal avec pour objectif principal de minimiser l'erreur le plus possible. Reissner [31][30] a proposé la théorie de plaque épaisse la plus simple en introduisant l'effet de cisaillement transversal par un complémentaire dans l'énergie principale. Mindlin [32] a présenté un travail différent de Reissner [31]. Son modèle basé sur la théorie de premier ordre de plaques, explique que la déformation de cisaillement dépend d'un facteur de correction de cisaillement. Dans cette théorie, les deux premières hypothèses de Kirchhoff sont maintenues.

Pour tenir compte de l'effet de cisaillement transversal, la théorie repose sur l'hypothèse de normalité définie ci-dessous :

- Toute section droite et perpendiculaire à la surface moyenne non-déformée reste droite mais pas nécessairement perpendiculaire à la surface moyenne déformée.

Cette hypothèse implique que la déformation de cisaillement transversale est différente de zéro, mais elle mène également à la violation statique de la contrainte de cisaillement qui est nulle sur les surfaces extérieures puisque la contrainte de cisaillement devient constante suivant toute l'épaisseur de la plaque. Pour compenser cette erreur, Mindlin [32] a proposé un facteur  $k$  de correction de cisaillement à appliquer pour la force de cisaillement. En outre, Mindlin [32] a modifié la quatrième hypothèse de sorte que :

- L'effet de l'inertie de rotation soit inclus.

Dans la littérature, les vibrations des plaques fondées sur les hypothèses du premier ordre de cisaillement transversal sont largement mentionnées sous le nom de plaques de Mindlin, Reissner-Mindlin ou Hencky-Mindlin.

Dans la théorie du premier ordre des plaques, le champ de déplacement (cf. Figure I- 15) est exprimé sous la forme suivante par Mindlin, 1951[32] :

La théorie du premier ordre est basée sur le champ de déplacement suivant :

$$u(x, y, z) = u_0(x, y) + z\phi_x(x, y),$$

$$v(x, y, z) = v_0(x, y) + z\phi_y(x, y),$$

$$w(x, y, z) = w_0(x, y),$$

Avec :  $(u_0, v_0, w_0)$  et  $(\phi_x, \phi_y)$  les déplacements en membrane et les rotations autour des axes  $y$  et  $x$ , respectivement.

Le champ de déplacements définis dans l'expression ci-dessus permet de reprendre la théorie classique des plaques décrite dans la dernière section par le remplacement  $\phi_x = -\frac{\partial w_0}{\partial x}$ ,

$$\phi_y = -\frac{\partial w_0}{\partial y}.$$

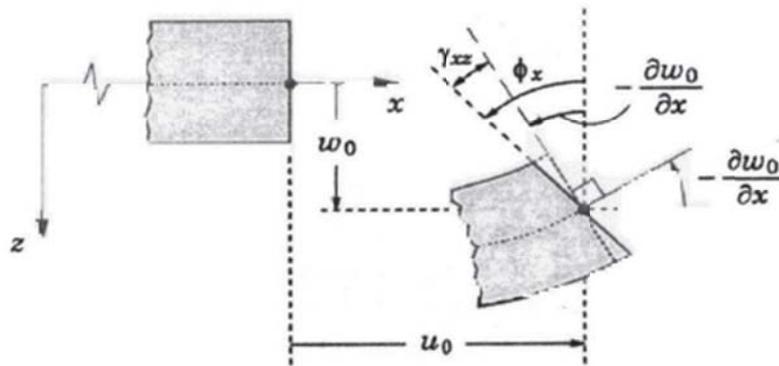


Figure I- 15: Illustration de la plaque de Reissner-Mindlin [24].

### I.7.3 La théorie de déformation en cisaillement d'ordre élevé (HSDT)

D'ailleurs pour éviter l'introduction d'un facteur de correction, des théories de déformation en cisaillement d'ordre élevée ont été développées. À la différence de la théorie CPT et la théorie FSDT, la théorie de déformation en cisaillement d'ordre élevé (HSDT) n'intègre pas un facteur de correction de cisaillement grâce au développement des théories de déformation en cisaillement d'ordre élevée avec les acceptations de la distribution linéaire du déplacement par l'épaisseur et la théorie d'ordre élevé basée sur une distribution non linéaire des champs dans l'épaisseur. Par conséquent, on tient compte des effets de la déformation transversale, du cisaillement et / ou de la déformation normale transversale comme le montre la Figure I- 16. Ces modèles n'exigent pas des facteurs de correction. Les références sur de tels modèles peuvent être trouvées dans (Hildebrand et al., 1949 [33] ; Naghdi, 1957 [34] ; Reissner,1975 [30] ; Reddy,1984 [35] ; Kant et Swaminathan,2002 [36] ). Nous avons introduit ici quatre modèles de plaque utilisés pour analyser le comportement des matériaux à gradient de propriétés.

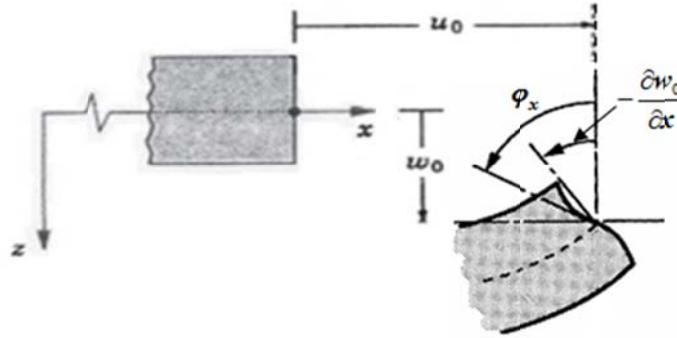


Figure I- 16 : Illustration de la plaque d'ordre élevé [24].

Le champ de déplacement est généralement écrit comme suit :

$$\begin{aligned} u(x, y, z) &= u_0(x, y) - z \frac{\partial w_0(x, y)}{\partial x} + f(z) \phi_x(x, y), \\ v(x, y, z) &= v_0(x, y) - z \frac{\partial w_0(x, y)}{\partial y} + f(z) \phi_y(x, y), \\ w(x, y, z) &= w_0(x, y), \end{aligned}$$

Avec :  $(u_0, v_0, w_0)$  et  $(\phi_x, \phi_y)$  les déplacements en membrane et les rotations autour des axes

$y$  et  $x$ , respectivement  $(\phi_x = \frac{\partial w_0}{\partial x} + \phi_x, \phi_y = \frac{\partial w_0}{\partial y} + \phi_y)$ ,  $\Psi(z)$  est une fonction de

cisaillement transversal caractérisant les théories correspondantes. En effet, les déplacements de la théorie classique de plaque (CPT) sont obtenus en prenant  $\Psi(z) = 0$ , alors que la théorie de premier ordre (FSDT) peut être obtenue par  $\Psi(z) = z$ .

Les déplacements de théorie de déformation de cisaillement de Reddy (TSDT) [24], [33] sont obtenus par :

$$f(z) = z \left( 1 - \frac{4}{3h^2} z^2 \right)$$

Dans le modèle de Reddy [24], [33], le champ de déplacement membranaire est cubique. Ce modèle donne une bonne approximation pour les contraintes de cisaillement transversal par rapport à la solution d'élasticité tridimensionnelle.

La distribution des contraintes de cisaillement transversal est parabolique dans l'épaisseur. Les conditions aux limites sur les surfaces libres sont satisfaisantes.

Touratier [37] propose le modèle sinus (SSDT) qui est différent des autres modèles d'ordre supérieurs puisqu'il n'utilise pas de fonction polynomiale. Une fonction trigonométrique sinusoïdale est donc introduite pour modéliser la répartition des contraintes de cisaillement dans l'épaisseur. La fonction de cisaillement transversale s'écrit comme suit :

$$f(z) = \frac{h}{\pi} \sin\left(\frac{\pi z}{h}\right)$$

Les contraintes de cisaillement transversal déterminées par les modèles (sinus) prennent une forme sinusoïdale dans l'épaisseur de la poutre. La précision de ce modèle par rapport à la solution exacte est meilleure que la théorie de Reddy [24], [33].

La version exponentielle de la théorie de déformation de cisaillement d'ordre élevé (The exponential shear deformation plate theory ESDPT) développée par Karama et al. [38] est obtenue en prenant :

$$f(z) = ze^{-2(z/h)^2}$$

## I.8 Conclusion

Dans ce chapitre une synthèse des travaux de la littérature des matériaux fonctionnellement gradués ainsi que les différentes théories des plaques est illustrée. Un aperçu sur les méthodes de fabrication et leur utilisation dans le domaine de génie civil est présenté.

L'exploration et l'étude de ces types de matériaux innovants s'avère primordial surtout avec l'évolution technologique et l'apparition des techniques d'impression 3D et de fabrication additive. Il y a plusieurs façons d'aborder cette thématique de recherche :

- Par des approches expérimentales sur des échantillons de matériaux permettant d'évaluer leurs caractéristiques ou par des expérimentations à l'échelle de la structure (de plaques ou de poutres...) pour comprendre leur comportement.
- Par modélisation des matériaux ou des textures afin d'étudier leur comportement.
- Par des calculs purement théoriques à travers l'analyse du travail de structures spécifiques à partir desquelles on obtient une vision plus générale.

Chacune des approches citées ci-dessus a certains avantages. La première donne souvent un rendement élevé mais nécessite aussi des coûts d'investissement élevés ce qui peut freiner cette approche. La deuxième approche, quant à elle, est assez intuitive, avec une grande précision mais nécessite une puissance de calcul très élevée, et par conséquent un moteur de calcul puissant pour répondre aux exigences. La troisième approche est la plus simple et répond toujours aux objectifs souhaités. De plus, cette dernière est la plus courante et la plus adoptée par la majorité des membres de la communauté scientifique. Lors du prochain chapitre, on s'intéressera uniquement à la troisième approche pour analyser l'objet à travers le problème de la structure FGM.

## Références bibliographies

- [1] C. Baron., S. Naili, Propagation d'ondes élastiques au sein d'un guide d'ondes élastiques anisotrope à gradient unidirectionnel sous chargement fluide, *Compte Rendue Mécanique*. 336 (2008) 772–730.
- [2] A. Kawasaki, R. Watanabe, Concept and P/M fabrication of functionally gradient materials, *Ceram. Int.* 23 (1997) 73–83. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0272-8842\(95\)00143-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0272-8842(95)00143-3).
- [3] M. Koizumi, The concept of FGM. *Ceramic Transactions, Funct. Gradient Mater.* 34 (1993) 3–10.
- [4] H. Toshio, L. Chen, Recent and prospective development of functionally graded materials in Japan, *Mater. Sci. Forum.* (1999) 308-311,509-514. <https://doi.org/https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.308-311.509>.
- [5] C. Siew Hwa, Performance and emissions characteristics of a partially insulated gasoline engine, *Int. J. Therm. Sci.* 40 (2001) 255–261. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1290-0729\(00\)01215-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1290-0729(00)01215-1).
- [6] S. Uemura, The activities of FGM on new applications, *Mater. Sci. Forum.* 423–425 (2003) 1–10.
- [7] K. Rajesh, N. Bhangale, C.P. Ganesan, Linear thermoelastic buckling and free vibration behavior of functionally graded truncated conical shells, *J. Sound Vib.* (2006) 341–371.
- [8] Z. Zhong., T. Yu, Analytical solution of cantilever functionally graded beam, *Compos. Sci. Technol.* 67 (2007) 481–488.
- [9] V. Birman, L.. Byrd, Modeling and analysis of functionally graded materials and structures, *Appl. Mech. Rev.* 60 (2007) 195–216.
- [10] A. Gupta, M. Talha, Recent development in modeling and analysis of functionally graded materials and structures, *Prog. Aerosp. Sci.* 79 (2015) 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2015.07.001>.
- [11] R. Gunes, I. Ozkes, F. Nair, M. Kemal Apalak, Experimental investigation of the low-velocity impact response of sandwich plates with functionally graded core, *J. Compos. Mater.* 54 (2020) 3571–3593. <https://doi.org/10.1177/0021998320915962>.
- [12] A. Pandey, S.K. Pradhan, Investigations into Complete Liquefier Dynamics and Optimization of Process Parameters for Fused Deposition Modeling, *Mater. Today Proc.* 5 (2018) 12940–12955. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.02.279>.
- [13] R. Singh, H. Garg, S. Singh, Process Capability Comparison of Fused Deposition Modelling for ABS and Fe-Nylon (6) Feedstock Filaments, *Mater. Today Proc.* 5 (2018) 4258–4268. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.690>.
- [14] M.C. Leu, B.K. Deuser, L. Tang, R.G. Landers, G.E. Hilmas, J.L. Watts, Freeze-form extrusion fabrication of functionally graded materials, *CIRP Ann.* 61 (2012) 223–226. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.03.050>.
- [15] N. Singh, R. Singh, I.P.S. Ahuja, On Development of Functionally Graded Material Through Fused Deposition Modelling Assisted Investment Casting from Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC Reinforced Waste Low Density Polyethylene, *Trans. Indian Inst. Met.* 71 (2018) 2479–

2485. <https://doi.org/10.1007/s12666-018-1378-9>.
- [16] M. Srivastava, S. Maheshwari, T.K. Kundra, S. Rathee, R. Yashaswi, S. Kumar Sharma, Virtual Design, Modelling and Analysis of Functionally graded materials by Fused Deposition Modeling, *Mater. Today Proc.* 3 (2016) 3660–3665. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2016.11.010>.
- [17] Additive manufacturing, <https://www.manufacturingguide.com/en/additiv-tillverkning>, (2013) (accessed 8/30.2013)., (n.d.).
- [18] Y. Jin, Y. He, J. Fu, W. Gan, Z. Lin, Optimization of tool-path generation for material extrusion-based additive manufacturing technology, *Addit. Manuf.* 1–4 (2014) 32–47. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2014.08.004>.
- [19] C. Zhou, Y. Chen, Z. Yang, B. Khoshnevis, Digital material fabrication using mask-image-projection-based stereolithography, *Rapid Prototyp. J.* 19 (2013) 153–165. <https://doi.org/10.1108/13552541311312148>.
- [20] S. Kirihara, Additive manufacturing of ceramic components using laser scanning stereolithography, *Weld. World.* 60 (2016) 697–702. <https://doi.org/10.1007/s40194-016-0331-y>.
- [21] H. Kim, J. Choi, R. Wicker, Scheduling and process planning for multiple material stereolithography, *Rapid Prototyp. J.* 16 (2010) 232–240. <https://doi.org/10.1108/13552541011049243>.
- [22] T. Liu, S. Guessasma, J. Zhu, W. Zhang, S. Belhabib, Functionally graded materials from topology optimisation and stereolithography, *Eur. Polym. J.* 108 (2018) 199–211. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2018.08.038>.
- [23] P. Gonzalez, E. Schwarzer, U. Scheithauer, N. Kooijmans, T. Moritz, Additive Manufacturing of Functionally Graded Ceramic Materials by Stereolithography, *J. Vis. Exp.* (2019). <https://doi.org/10.3791/57943>.
- [24] J.N. Reddy, *Mechanics of Laminated Composites Plates: Theory and Analysis*. CRC Press, Boca Raton, (1997).
- [25] M. Herrmann, W. Sobek, Functionally graded concrete: Numerical design methods and experimental tests of mass-optimized structural components, *Struct. Concr.* 18 (2017) 54–66. <https://doi.org/10.1002/suco.201600011>.
- [26] G. Bao., L. Wang, Multiple cracking in functionally graded ceramic/metal coatings, *Int. J. Solids Struct.* 32 (1995) 2853–2871.
- [27] C.. Shyang-ho., C. Yen-Ling, Cracking in coating-substrate composites of multi-layered and sigmoid FGM coatings, *Eng. Fract. Mech.* 70 (2003) 1227–1243.
- [28] L. Lostec, *Elaboration par coulage en bande et caractérisation microstructurale et mécanique de composite SiC/MAS-L*, Thèse de l’université de Limoges, 1997.
- [29] G. Kirchhoff, Über das Gleichgewicht und die Bewegung einer elastischen Scheibe, *J. Für Die Reine Und Angew.* 40 (1850) 51–88.
- [30] E. Reissner, On transverse bending of plates, including the effects of transverse shear deformation, *Int. J. Solids Struct.* 25 (1975) 495–502.
- [31] E. Reissner, The effect of transverse shear deformation on the bending of elastic plates,

- J. Appl. Mech. (1945) 69–77.
- [32] R.D. Mindlin, Influence of rotatory inertia and shear on flexural motions of isotropic, elastic plates, ASME J. Appl. Mech. 18 (1951) 31–38.
- [33] F.B. Hildebrand., E. Reissner., G.G. Thomas, Notes on the foundations of theory of small displacements of orthotropic shells. NACA T. N. N°:1833, (1949).
- [34] P.M. Naghdi, On the theory of thin elastic shells, Q. Appl. Math. 14 (1957) 369–380.
- [35] J.N. Reddy, A simple higher-order theory for laminated composite plates, J. Appl. Mech. 51 (1984) 745–752.
- [36] T. Kant., K. Swaminathan, Analytical solutions for the static analysis of laminated composite and sandwich plates based on a higher order refined theory, Compos. Struct. 56 (2002) 329–344.
- [37] M. Touratier, An efficient standard plate theory, Int. J. Eng. Sc. 29 (1991) 901–916.
- [38] M. Karama, K.S. Afaq, S. Mistou, Mechanical behaviour of laminated composite beam by the new multi-layered laminated composite structures model with transverse shear stress continuity, Int. J. Solids Struct. 40 (2003) 1525–1546.

**CHAPITRE II. ETUDE DE LA RÉPONSE  
HYGRO-THERMO-MÉCANIQUE DES  
PLAQUES FONCTIONNELLEMENT  
GRADUÉES**



## Liste des symboles

|  |  |
|--|--|
| $E(z)$                                       | Module de Young en fonction de « z »                               |
| $\nu(z)$                                     | Coefficient de Poisson en fonction de « z »                        |
| $V(z)$                                       | Fraction volumique   |
| $p$  | L'indice matériel  |
| $a$  | Longueur de la plaque  |
| $b$  | Largeur de la plaque   |
| $h$  | Epaisseur de la plaque   |
| $u_0, v_0, w_0$                              | Composantes du champ de déplacement sur le plan moyen de la plaque |
| $u, v, w$                                    | Les déplacements dans les directions $x, y, z$                     |
| $\varphi_x, \varphi_y$                       | Les rotations autour des axes $x$ et $y$                           |
| $f(z)$                                       | Fonction de gauchissement (fonction de cisaillement transversal)   |
| $\sigma_x, \sigma_y$                         | Contraintes normales   |
| $\tau_{xz}, \tau_{yz}$                       | Contraintes de cisaillement  |
| $\varepsilon_x, \varepsilon_y$               | Déformation dans la direction $x, y$ et $z$                        |
| $\gamma_{xz}, \gamma_{yz}$                   | Déformations de distorsion   |
| $\delta u, \delta v, \delta w$               | Champ virtuel de déplacement                                       |
| $\delta W_{\text{int}}$                      | Travail virtuel intérieur  |
| $\delta W_{\text{ext}}$                      | Travail virtuel extérieur  |
| $\delta \varepsilon_x, \delta \varepsilon_y$ | Champ de déformation longitudinal virtuel                          |
| $\delta \gamma_{xz}, \delta \gamma_{yz}$     | Champ de déformation transversal virtuel                           |
| $N_x, N_y, N_{xy}$                           | Efforts normaux  |

|                    |  |
|--------------------|--|
| $M_x, M_y, M_{xy}$ | Moments de flexion   |
| $S_x, S_y, S_{xy}$ | Moment supplémentaire du au cisaillement transverse                      |
| $R_{xz}, R_{yz}$   | Effort de cisaillement   |
| $\partial$         | Dérivée partielle  |
| $i$ et $j$         | Sont des nombres naturels.   |
| $A_{ij}$           | Termes de rigidité de la matrice de membrane                             |
| $B_{ij}$           | Termes de rigidité de la matrice de couplage                             |
| $D_{ij}$           | Termes de la matrice de flexion  |
| $B_{ij}^s$         | Termes de rigidité de la matrice   |
| $D_{ij}^s$         | Termes de rigidité de la matrice   |
| $H_{ij}^s$         | Termes de rigidité de la matrice   |
| $A_{ij}^s$         | Termes de rigidité de la matrice   |
| $T$                | Chargement thermique   |
| $C$                | Chargement hydrique  |
| $\alpha, \beta$    | Coefficient d'expansion thermique et hydrique respectivement             |
| $\psi(z)$          | La distribution de la température et de l'humidité à travers l'épaisseur |
| $\{ \}$            | Vecteur colonne  |
| $[ ]$              | Matrice  |

## **II.1 Introduction**

Les matériaux fonctionnels (FGM) sont la nouvelle génération de matériaux composites dont les caractéristiques sont modifiées et adaptées dans le sens spatial pour améliorer les performances structurelles globales. Par exemple, des revêtements résistants à l'usure pour manipuler de grosses particules de minerai abrasif, des boucliers thermiques de fusée, des échangeurs de chaleur, des générateurs thermoélectriques, des composants de moteurs thermiques, des revêtements de plasma pour réacteurs de fusion et des isolants électriques. Les joints céramiques sont largement utilisés dans de nombreuses applications structurelles telles que la mécanique, le génie civil, l'optique, l'électronique, la chimie, la biomédecine, les sources d'énergie, le nucléaire, l'automobile et la construction navale pour minimiser les déséquilibres thermo-mécaniques. Swaminathan et Naveenkumar, 2014 [1] ; Darilmaz, 2015 [2]; Kar et al., 2015 [3]; Hadji et Adda Bedia, 2015 [4] ; Ait Yahia, 2015 [5] ; Akavci, 2015 [6].

Actuellement, diverses investigations sont menées pour étudier théoriquement le comportement de réponse thermo-mécanique des structures FG. Zhang et al. 1994 [7] ont proposé une méthode analytique pour cylindre FG à symétrie axiale basée sur la théorie de l'élasticité thermique. Reddy et Chen, 2001 [8] ont mis au point un modèle tridimensionnel pour une plaque FG soumise à des charges mécaniques et thermiques, toutes les deux sont appliquées au sommet de la plaque. L'analyse de la réponse thermo-mécanique des cylindres circulaires creux fabriqués avec des FGM a été étudiée par Liew et al., 2003 [9]. Vel et Batra, 2003 [10] ont présenté une solution tridimensionnelle pour les contraintes thermiques transitoires dans les plaques rectangulaires FG. L'analyse de flambement des plaques rectangulaires FG déformables par cisaillement soumises à des charges thermomécaniques a été étudiée par Shukla et al. 2007 [11] en utilisant FSDT.

Le but de ce travail est d'étudier la réponse en flexion de plaques FG reposant sur des fondations élastiques variables à deux paramètres et soumises à des charges hygro-thermo-mécaniques. L'utilisation du terme intégral dans la cinématique a conduit à une réduction du nombre de variables et d'équations d'équilibre. Ces dernières sont déduites en utilisant le nouveau modèle HSDT proposé contenant l'effet hygro-thermo-mécanique et l'interaction entre la plaque et les fondations élastiques. Les résultats obtenus par le présent modèle sont comparés à ceux rapportés par d'autres modèle HSDT disponibles dans la littérature. Quelques exemples numériques sont proposés pour démontrer les influences de différents paramètres sur la réponse de flexion hygro-thermo-mécanique des plaques FG.

## II.2 Formulation mathématique

Considérons une plaque rectangulaire de côté  $a \times b$  et d'épaisseur  $h$ , attribuée à un système de coordonnées cartésiennes  $(x, y, z)$ , où  $(x, y)$  est le plan qui coïncide avec la surface médiane, de la plaque et  $(z)$  est l'axe suivant l'épaisseur  $(-h/2 \leq z \leq h/2)$ , comme présenté sur la Figure II- 1.

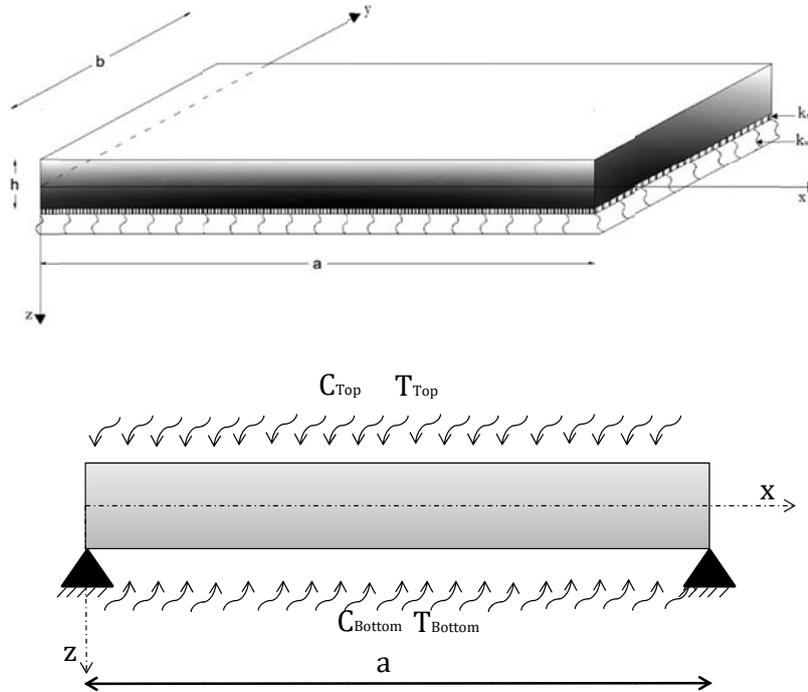


Figure II- 1: Géométrie et coordonnées de la plaque rectangulaire FGM reposant sur une fondation élastique et soumise aux conditions de l'environnement.

La plaque FG est soumise à un chargement mécanique transversal  $q(x, y)$ , à un champ de température  $T(x, y, z)$ , ainsi qu'à une concentration d'humidité  $C(x, y, z)$ . Les propriétés matérielles de la plaque sont supposées varier d'une façon graduelle à travers l'épaisseur. En appliquant une distribution de la loi de puissance simple, la fraction volumique  $V(z)$  du métal et de la céramique est donnée par :

$$V_c(z) = \left( \frac{z}{h} + \frac{1}{2} \right)^p, \quad (0 \leq p \leq \infty), \quad V_c(z) + V_m(z) = 1 \quad (1)$$

Où  $p$  est l'indice matériel en puissance,  $c$  et  $m$  les indices représentant la céramique et le métal respectivement. Les propriétés matérielles  $P$  de la plaque FG sont définies par le module de Young  $E$ , le coefficient de poisson  $\nu$ , le coefficient de dilatation thermique  $\alpha$  et le coefficient d'expansion hydrique  $\beta$ .  $P$  est défini par l'équation suivante:

$$P(z) = (P_c - P_m)V_c(z) + P_m \quad (2)$$

## II.2.1 Champ de déplacement

Le champ de déplacement du modèle proposé permet de réduire le nombre d'inconnues, ce qui permet de réduire le coût ainsi que le temps de calcul. Ce modèle est défini par [12]:

$$u(x, y, z) = u_0(x, y) - z \frac{\partial w_0}{\partial x} + k_1 f(z) \int \theta(x, y) dx \quad (3a)$$

$$v(x, y, z) = v_0(x, y) - z \frac{\partial w_0}{\partial y} + k_2 f(z) \int \theta(x, y) dy \quad (3b)$$

$$w(x, y, z) = w_0(x, y) \quad (3c)$$

Où  $u_0(x, y)$ ,  $v_0(x, y)$ , et  $w_0(x, y)$ , sont les fonctions du déplacement du plan médian de la plaque. Le terme mathématique  $\theta(x, y)$  permet de déterminer les rotations de la section transversale autour des axes x et y.

Dans ce travail, la HSDT est obtenue en définissant [12]:

$$f(z) = \frac{z \cosh(\pi/2) - (h/\pi) \sinh\left(\frac{\pi}{h} z\right)}{\cosh(\pi/2) - 1} \quad (4)$$

Les équations de la cinématique (3) contiennent seulement 04 variables ( $u_0, v_0, w_0$  and  $\theta$ ).

Les déformations non-nulles, associées à la cinématique sont données comme suit :

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} k_x^0 \\ k_y^0 \\ k_{xy}^0 \end{Bmatrix} + f(z) \begin{Bmatrix} L_x^0 \\ L_y^0 \\ L_{xy}^0 \end{Bmatrix}, \quad \begin{Bmatrix} \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix} = g(z) \begin{Bmatrix} \gamma_{yz}^0 \\ \gamma_{xz}^0 \end{Bmatrix}, \quad (5a)$$

Où

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u_0}{\partial x} \\ \frac{\partial v_0}{\partial x} \\ \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \end{Bmatrix}, \quad \begin{Bmatrix} k_x^0 \\ k_y^0 \\ k_{xy}^0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ -\frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ -2 \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix}, \quad \begin{Bmatrix} L_x^0 \\ L_y^0 \\ L_{xy}^0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} k_1 \theta \\ k_2 \theta \\ k_1 \frac{\partial}{\partial y} \int \theta dx + k_2 \frac{\partial}{\partial x} \int \theta dy \end{Bmatrix}, \quad (5b)$$

$$\begin{Bmatrix} \gamma_{yz}^0 \\ \gamma_{xz}^0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} k_2 \int \theta dy \\ k_1 \int \theta dx \end{Bmatrix},$$

Et

$$g(z) = \frac{df(z)}{dz} \quad (5c)$$

Les intégrales utilisées dans les équations ci-dessus doivent être résolues par une solution de Navier et peuvent être exprimées comme suit :

$$\frac{\partial}{\partial y} \int \theta dx = A' \frac{\partial^2 \theta}{\partial x \partial y}, \quad \frac{\partial}{\partial x} \int \theta dy = B' \frac{\partial^2 \theta}{\partial x \partial y}, \quad \int \theta dx = A' \frac{\partial \theta}{\partial x}, \quad \int \theta dy = B' \frac{\partial \theta}{\partial y} \quad (6)$$

Où les coefficients  $A'$  et  $B'$  sont définis en fonction de la solution utilisée, moyennant la solution analytique proposée par Navier. Donc,  $A'$ ,  $B'$ ,  $k_1$  et  $k_2$  sont définis comme suit :

$$A' = -\frac{1}{\lambda^2}, \quad B' = -\frac{1}{\mu^2}, \quad k_1 = \lambda^2, \quad k_2 = \mu^2 \quad (7)$$

Où  $\lambda$  et  $\mu$  sont donnés par l'équation (24).

## II.2.2 Équations constitutives

La formulation constitutive avec la contrainte Green-Lagrange et la seconde contrainte Piola-Kirchhoff avec effet hygrothermique est donnée ainsi :

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{66} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x - \alpha \Delta T - \beta \Delta C \\ \varepsilon_y - \alpha \Delta T - \beta \Delta C \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix} \quad (8)$$

où  $(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz})$  et  $(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{xz})$  sont les composantes des contraintes et des déformations respectivement. En utilisant les propriétés matérielles définies en Eq. (2), les coefficients de rigidité,  $C_{ij}$ , sont donnés par l'expression suivante :

$$C_{11} = C_{22} = \frac{E(z)}{1-\nu^2}, \quad C_{12} = \frac{\nu E(z)}{1-\nu^2}, \quad C_{44} = C_{55} = C_{66} = \frac{E(z)}{2(1+\nu)}, \quad (10)$$

Où  $\Delta T = T - T_0$ ,  $\Delta C = C - C_0$ ,  $T_0$  étant la température de référence et  $C_0$  la concentration d'humidité de référence. Dans cette section, la concentration d'humidité  $C(x, y, z)$  et le champ de distribution de la température  $T(x, y, z)$  sont exprimés ci-dessous : (Bouderba et al., 2013 [13]) :

$$T(x, y, z) = T_1(x, y) + \frac{z}{h} T_2(x, y) + \bar{\Psi}(z) T_3(x, y) \quad (11a)$$

$$C(x, y, z) = C_1(x, y) + \frac{z}{h} C_2(x, y) + \bar{\Psi}(z) C_3(x, y) \quad (11b)$$

Tel que :

$\bar{\Psi}(z) = \frac{1}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{h} z\right)$  Dans le cas d'une distribution de température sinusoïdale ;

$\bar{\Psi}(z) = \frac{z}{h} \left(1 - \frac{4}{3} \left(\frac{z}{h}\right)^2\right)$  dans le cas d'une distribution de température cubique ;

Et  $\bar{\Psi}(z) = \frac{z}{h} e^{-2\left(\frac{z}{h}\right)^2}$  dans le cas d'une distribution de température exponentielle.

### II.2.3 Le principe du travail virtuel

Les équations d'équilibre peuvent être déterminées en utilisant le principe des déplacements virtuels, reposant sur le principe de conservation d'énergie.

$$\int_{\Omega-h/2}^{h/2} \int_{\Omega} \left[ \sigma_x \delta \varepsilon_x + \sigma_y \delta \varepsilon_y + \tau_{xy} \delta \gamma_{xy} + \tau_{xz} \delta \gamma_{xz} + \tau_{yz} \delta \gamma_{yz} \right] d z d \Omega - \int_{\Omega} (q - f_e) \delta w d \Omega = 0 \quad (12)$$

Avec  $\Omega$  le domaine spatial, et  $f_e$  la réaction de fondation qui est donnée par le modèle de Winkler-Pasternak [14] :

$$f_e = K_w w - K_{sx} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - K_{sy} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \quad (13)$$

Où  $K_w$  est le coefficient de rigidité verticale du sol (coefficient élastique de la fondation),  $K_{sx}$  et  $K_{sy}$  sont les modules de cisaillement de la fondation (rigidité de fondation en cisaillement). Si la fondation est homogène et isotrope, Cela implique que  $K_{sx} = K_{sy} = K_s$ . Si la rigidité de la fondation en cisaillement est négligée, la fondation de type Pasternak devient de type Winkler.

En remplaçant (5) et (8) dans l'équation (12) et en intégrant suivant l'épaisseur de la plaque, l'équation (12) peut être exprimée comme suit :

$$\int_{\Omega} \left[ N_x \delta \varepsilon_x^0 + N_y \delta \varepsilon_y^0 + N_{xy} \delta \gamma_{xy}^0 + M_x \delta k_x^0 + M_y \delta k_y^0 + M_{xy} \delta k_{xy}^0 + S_x \delta L_x^0 + S_y \delta L_y^0 + S_{xy} \delta L_{xy}^0 + R_{yz} \delta \gamma_{yz}^0 + R_{xz} \delta \gamma_{xz}^0 \right] d \Omega - \int_{\Omega} (q - f_e) \delta w d \Omega = 0 \quad (14)$$

Avec  $N, M, S$ , et  $R$  les efforts internes, qui sont donnés comme suit :

$$(N_i, M_i, S_i) = \int_{-h/2}^{h/2} (1, z, f) \sigma_i d z, \quad (i = x, y, xy) \quad \text{et} \quad (R_{xz}, R_{yz}) = \int_{-h/2}^{h/2} g(\tau_{xz}, \tau_{yz}) d z \quad (15)$$

Remplaçons l'équation (8) dans l'équation (15) et en intégrant suivant l'épaisseur de la plaque, les efforts résultants sont exprimés ci-dessous :

$$\begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \\ S_x \\ S_y \\ S_{xy} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 & B_{11} & B_{12} & 0 & B_{11}^s & B_{12}^s & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 & B_{12} & B_{22} & 0 & B_{12}^s & B_{22}^s & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} & 0 & 0 & B_{66} & 0 & 0 & B_{66}^s \\ B_{11} & B_{12} & 0 & D_{11} & D_{12} & 0 & D_{11}^s & D_{12}^s & 0 \\ B_{12} & B_{22} & 0 & D_{12} & D_{22} & 0 & D_{12}^s & D_{22}^s & 0 \\ 0 & 0 & B_{66} & 0 & 0 & D_{66} & 0 & 0 & D_{66}^s \\ B_{11}^s & B_{12}^s & 0 & D_{11}^s & D_{12}^s & 0 & H_{11}^s & H_{12}^s & 0 \\ B_{12}^s & B_{22}^s & 0 & D_{12}^s & D_{22}^s & 0 & H_{12}^s & H_{22}^s & 0 \\ 0 & 0 & B_{66}^s & 0 & 0 & D_{66}^s & 0 & 0 & H_{66}^s \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ k_x^0 \\ k_y^0 \\ k_{xy}^0 \\ L_x^0 \\ L_y^0 \\ L_{xy}^0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} N_x^T \\ N_y^T \\ 0 \\ M_x^T \\ M_y^T \\ 0 \\ S_x^T \\ S_y^T \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} N_x^C \\ N_y^C \\ 0 \\ M_x^C \\ M_y^C \\ 0 \\ S_x^C \\ S_y^C \\ 0 \end{pmatrix} \quad (16a)$$

$$\begin{pmatrix} R_{yz} \\ R_{xz} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A_{44}^s & 0 \\ 0 & A_{55}^s \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \gamma_{yz}^0 \\ \gamma_{xz}^0 \end{pmatrix} \quad (16b)$$

Les coefficients de rigidité sont exprimés par :

$$\begin{pmatrix} A_{11} & B_{11} & D_{11} & B_{11}^s & D_{11}^s & H_{11}^s \\ A_{12} & B_{12} & D_{12} & B_{12}^s & D_{12}^s & H_{12}^s \\ A_{66} & B_{66} & D_{66} & B_{66}^s & D_{66}^s & H_{66}^s \end{pmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} C_{11} \left( 1, z, z^2, f(z), z f(z), f^2(z) \right) \begin{pmatrix} 1 \\ \nu \\ \frac{1-\nu}{2} \end{pmatrix} dz, \quad (17a)$$

$$(A_{22}, B_{22}, D_{22}, B_{22}^s, D_{22}^s, H_{22}^s) = (A_{11}, B_{11}, D_{11}, B_{11}^s, D_{11}^s, H_{11}^s), \quad (17b)$$

$$A_{44}^s = A_{55}^s = \int_{-h/2}^{h/2} C_{44} [g(z)]^2 dz \quad (17c)$$

Les efforts et les moments résultants d'origine thermique et hygrique,  $N_x^T = N_y^T$ ,  $M_x^T = M_y^T$ ,

$S_x^T = S_y^T$ ,  $N_x^C = N_y^C$ ,  $M_x^C = M_y^C$ ,  $S_x^C = S_y^C$ , sont définis par :

$$\begin{pmatrix} N_x^T \\ M_x^T \\ S_x^T \end{pmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} \frac{E(z)}{1-\nu} \alpha(z) T \begin{pmatrix} 1 \\ z \\ f(z) \end{pmatrix} dz \quad (18a)$$

$$\begin{pmatrix} N_x^C \\ M_x^C \\ S_x^C \end{pmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} \frac{E(z)}{1-\nu} \beta(z) C \begin{pmatrix} 1 \\ z \\ f(z) \end{pmatrix} dz \quad (18b)$$

Les équations d'équilibre peuvent être obtenu à partir de l'équation (14), en intégrant par partie et en séparant les coefficients  $\delta u_0$ ,  $\delta v_0$ ,  $\delta w_0$  et  $\delta \theta$ . Ainsi, on peut obtenir les équations associées aux modèle HSDT :

$$\begin{aligned}
 \delta u_0 : \quad & \frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial y} = 0 \\
 \delta v_0 : \quad & \frac{\partial N_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial N_y}{\partial y} = 0 \\
 \delta w_0 : \quad & \frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} + f_e + q = 0 \\
 \delta \theta : \quad & -k_1 A' \frac{\partial^2 S_x}{\partial x^2} - k_2 B' \frac{\partial^2 S_y}{\partial y^2} - k_1 A' \frac{\partial^2 S_{xy}}{\partial x \partial y} - k_2 B' \frac{\partial^2 S_{xy}}{\partial x \partial y} + k_1 A' \frac{\partial R_{xz}}{\partial x} + k_2 B' \frac{\partial R_{yz}}{\partial y} = 0
 \end{aligned} \tag{19}$$

Remplaçons l'équation (16) dans l'équation (19), les équations d'équilibre peuvent être exprimées en termes de déplacement de la manière suivante:

$$\begin{aligned}
 A_{11} d_{11} u_0 + A_{66} d_{22} u_0 + (A_{12} + A_{66}) d_{12} v_0 - B_{11} d_{111} w_0 - (B_{12} + 2B_{66}) d_{122} w_0 \\
 + (B_{66}^s (k_1 A' + k_2 B') + B_{12}^s k_2 B') d_{122} \theta + B_{11}^s k_1 A' d_{111} \theta = F_1
 \end{aligned} \tag{20a}$$

$$\begin{aligned}
 A_{22} d_{22} v_0 + A_{66} d_{11} v_0 + (A_{12} + A_{66}) d_{12} u_0 - B_{22} d_{222} w_0 - (B_{12} + 2B_{66}) d_{112} w_0 \\
 + (B_{66}^s (k_1 A' + k_2 B') + B_{12}^s k_1 A') d_{112} \theta + B_{22}^s k_2 B' d_{222} \theta = F_2
 \end{aligned} \tag{20b}$$

$$\begin{aligned}
 B_{11} d_{111} u_0 + (B_{12} + 2B_{66}) d_{122} u_0 + (B_{12} + 2B_{66}) d_{112} v_0 + B_{22} d_{222} v_0 - D_{11} d_{1111} w_0 - 2(D_{12} + 2D_{66}) d_{1122} w_0 \\
 - D_{22} d_{2222} w_0 + D_{11}^s k_1 A' d_{1111} \theta + ((D_{12}^s + 2D_{66}^s)(k_1 A' + k_2 B')) d_{1122} \theta + D_{22}^s k_2 B' d_{2222} \theta + f_e = F_3
 \end{aligned} \tag{20c}$$

$$\begin{aligned}
 -k_1 A' B_{11}^s d_{111} u_0 - (B_{12}^s k_2 B' + B_{66}^s (k_1 A' + k_2 B')) d_{122} u_0 - (B_{12}^s k_1 A' + B_{66}^s (k_1 A' + k_2 B')) d_{112} v_0 - B_{22}^s k_2 B' d_{222} v_0 \\
 + D_{11}^s k_1 A' d_{1111} w_0 + ((D_{12}^s + 2D_{66}^s)(k_1 A' + k_2 B')) d_{1122} w_0 + D_{22}^s k_2 B' d_{2222} w_0 - H_{11}^s (k_1 A')^2 d_{1111} \theta \\
 - H_{22}^s (k_2 B')^2 d_{2222} \theta - (2H_{12}^s k_1 k_2 A' B' + (k_1 A' + k_2 B')^2 H_{66}^s) d_{1122} \theta + A_{44}^s (k_1 A')^2 d_{11} \theta + A_{55}^s (k_2 B')^2 d_{22} \theta = F_4
 \end{aligned} \tag{20d}$$

Avec  $d_{ij}$ ,  $d_{ijl}$  et  $d_{ijlm}$  les opérateurs différentiels suivants :

$$d_{ij} = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j}, \quad d_{ijl} = \frac{\partial^3}{\partial x_i \partial x_j \partial x_l}, \quad d_{ijlm} = \frac{\partial^4}{\partial x_i \partial x_j \partial x_l \partial x_m}, \quad d_i = \frac{\partial}{\partial x_i}, \quad (i, j, l, m = 1, 2). \tag{21}$$

Avec  $\{F\} = \{F_1, F_2, F_3, F_4\}'$  un vecteur de forces extérieures. Les composantes du vecteur de force généralisée  $\{F\}$  sont données par :

$$\begin{aligned}
 F_1 = \frac{\partial N_x^T}{\partial x} + \frac{\partial N_x^C}{\partial x}, \quad F_2 = \frac{\partial N_y^T}{\partial y} + \frac{\partial N_y^C}{\partial y}, \quad F_3 = -q + \frac{\partial^2 (M_x^T + M_x^C)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 (M_y^T + M_y^C)}{\partial y^2}, \\
 F_4 = \frac{\partial^2 (S_x^T + S_x^C)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 (S_y^T + S_y^C)}{\partial y^2}
 \end{aligned} \tag{22}$$

### II.3 Solution analytique pour une plaque simplement appuyée

Les plaques rectangulaires sont généralement classées en fonction du type d'appui utilisé. Nous nous sommes intéressés dans ce travail, à la détermination d'une solution exacte de l'équation (20) pour une plaque FG simplement appuyée. Afin de résoudre ce problème,

Navier a supposé le chargement mécanique transversal, la température et l'humidité,  $q$ ,  $T_i$  and  $C_i$  sous une forme de double série de Fourier [15] exprimée ci-dessous :

$$\begin{Bmatrix} q \\ T_i \\ C_i \end{Bmatrix} = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \begin{Bmatrix} q_0 \\ t_i \\ c_i \end{Bmatrix} \sin(\lambda x) \sin(\mu y), \quad (i = 1,2,3) \quad (23)$$

Où  $q_0$ ,  $t_i$  et  $c_i$  sont constants et  $T_i$  et  $C_i$  sont définis dans l'équation (11).

Avec :

$$\lambda = m\pi / a \quad \text{et} \quad \mu = n\pi / b \quad (24)$$

Suivant la méthode Navier, nous considérons les solutions analytiques suivantes pour  $u_0$ ,  $v_0$ ,  $w_0$  et  $\theta$  en satisfaisant les conditions aux limites :

$$\begin{Bmatrix} u_0 \\ v_0 \\ w_0 \\ \theta \end{Bmatrix} = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \begin{Bmatrix} U \cos(\lambda x) \sin(\mu y) \\ V \sin(\lambda x) \cos(\mu y) \\ W \sin(\lambda x) \sin(\mu y) \\ X \sin(\lambda x) \sin(\mu y) \end{Bmatrix} \quad (25)$$

Où  $U$ ,  $V$ ,  $W$ , et  $X$  sont des paramètres arbitraires à déterminer soumis à la condition que la solution de l'équation (25) satisfasse l'équation régissant (20). Remplaçons l'équation (25) dans l'équation (20), on obtient :

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & S_{34} \\ S_{14} & S_{24} & S_{34} & S_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U \\ V \\ W \\ X \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \end{Bmatrix} \quad (26)$$

Avec

$$\begin{aligned} S_{11} &= -A_{11}\lambda^2 - A_{66}\mu^2, \quad S_{12} = -\lambda\mu (A_{12} + A_{66}), \quad S_{13} = \lambda (B_{11}\lambda^2 + (B_{12} + 2B_{66})\mu^2), \\ S_{14} &= -\lambda \left( (k_2 B' B_{12}^s + (k_1 A' + k_2 B') B_{66}^s) \mu^2 + k_1 A' B_{11}^s \lambda^2 \right), \\ S_{22} &= -A_{66}\lambda^2 - A_{22}\mu^2, \quad S_{23} = \mu (B_{22}\mu^2 + (B_{12} + 2B_{66})\lambda^2), \\ S_{24} &= -\mu \left( (k_1 A' B_{12}^s + (k_1 A' + k_2 B') B_{66}^s) \lambda^2 + k_2 B' B_{22}^s \mu^2 \right), \\ S_{33} &= \lambda^2 \mu^2 \left( D_{11} k_1 B' \lambda^2 + (D_{12} + 2D_{66})(k_1 A' + k_2 B') + D_{22} k_2 A' \mu^2 - K_w (A' B') + K_{sx} B' + K_{sy} A' \right), \\ S_{34} &= k_1 A' D_{11}^s \lambda^4 + ((D_{12}^s + 2D_{66}^s)(k_1 A' + k_2 B')) \lambda^2 \mu^2 + k_2 B' D_{22}^s \mu^4, \\ S_{44} &= -(k_1 A')^2 H_{11}^s \lambda^4 - (2k_1 k_2 A' B' H_{12}^s + (k_1 A' + k_2 B')^2 H_{66}^s) \lambda^2 \mu^2 - (k_2 B')^2 H_{22}^s \mu^4 \\ &\quad - (k_1 A')^2 A_{44}^s \lambda^2 - (k_2 B')^2 A_{55}^s \mu^2 \end{aligned} \quad (27)$$

Les composantes du vecteur de force généralisée  $\{F\} = \{F_1, F_2, F_3, F_4\}^t$  sont données par

$$F_1 = \lambda \left( A^T t_1 + B^T t_2 + {}^a B^T t_3 + A^C c_1 + B^C c_2 + {}^a B^C c_3 \right) \quad (28a)$$

$$F_2 = \mu \left( A^T t_1 + B^T t_2 + {}^a B^T t_3 + A^C c_1 + B^C c_2 + {}^a B^C c_3 \right) \quad (28b)$$

$$F_3 = -q_0 - h \left( \lambda^2 + \mu^2 \right) \left( B^T t_1 + D^T t_2 + {}^a D^T t_3 + B^C c_1 + D^C c_2 + {}^a D^C c_3 \right) \quad (28c)$$

$$F_4 = -h \left( \lambda^2 + \mu^2 \right) \left( {}^s B^T t_1 + {}^s D^T t_2 + {}^s F^T t_3 + {}^s B^C c_1 + {}^s D^C c_2 + {}^s F^C c_3 \right) \quad (28d)$$

Où

$$\left[ A^T, B^T, D^T \right] = \int_{-h/2}^{h/2} \frac{E(z)}{1-\nu} \alpha(z) \left[ 1, \bar{z}, \bar{z}^2 \right] dz$$

$$\left[ A^C, B^C, D^C \right] = \int_{-h/2}^{h/2} \frac{E(z)}{1-\nu} \beta(z) \left[ 1, \bar{z}, \bar{z}^2 \right] dz$$

$$\left[ {}^a B^T, {}^a D^T \right] = \int_{-h/2}^{h/2} \frac{E(z)}{1-\nu} \alpha(z) \bar{\Psi}(z) \left[ 1, \bar{z} \right] dz$$

$$\left[ {}^a B^C, {}^a D^C \right] = \int_{-h/2}^{h/2} \frac{E(z)}{1-\nu} \beta(z) \bar{\Psi}(z) \left[ 1, \bar{z} \right] dz$$

$$\left[ {}^s B^T, {}^s D^T, {}^s F^T \right] = \int_{-h/2}^{h/2} \frac{E(z)}{1-\nu} \alpha(z) \bar{f}(z) \left[ 1, \bar{z}, \bar{\Psi}(z) \right] dz$$

$$\left[ {}^s B^C, {}^s D^C, {}^s F^C \right] = \int_{-h/2}^{h/2} \frac{E(z)}{1-\nu} \beta(z) \bar{f}(z) \left[ 1, \bar{z}, \bar{\Psi}(z) \right] dz$$

Avec lequel  $\bar{z} = z/h$ ,  $\bar{f}(z) = f(z)/h$

Et  $\bar{\Psi}(z) = \frac{1}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{h} z\right)$  Dans le cas d'une distribution de température sinusoïdale ;

$\bar{\Psi}(z) = \frac{z}{h} \left( 1 - \frac{4}{3} \left( \frac{z}{h} \right)^2 \right)$  Dans le cas d'une distribution de température cubique ;

$\bar{\Psi}(z) = \frac{z}{h} e^{-2\left(\frac{z}{h}\right)^2}$  Dans le cas d'une distribution de température exponentielle.

## II.4 Résultats et discussion

### II.4.1 Etude comparative 1

Dans cette section, des exemples numériques sont proposés et discutés pour vérifier la pertinence du modèle développé dans l'étude des comportements de flexion hygro-thermomécanique des plaques. Des comparaisons sont réalisées avec des solutions disponibles dans la littérature. Afin de vérifier l'exactitude de la présente analyse, certains

exemples numériques sont résolus. Les résultats obtenus sont comparés à ceux d'autres modèles prenant en compte l'effet de déformation du cisaillement disponible dans la littérature comme Laoufi et al. 2016 [16], le modèle de déformation du cisaillement trigonométrique(TSDT) et le modèle de déformation de cisaillement sinusoïdale (SSDT) [17] de Zenkour, 2006 [18]. Les propriétés matérielles des FGM sont indiquées dans le Tableau II-1. Dans ce travail, les résultats numériques pour le chargement mécanique sont montrés dans les quantités adimensionnelles définies comme suit [19] :

$$\bar{w} = \frac{10h^3 E_c}{a^4 q_0} w\left(\frac{a}{2}, \frac{b}{2}\right), \bar{\sigma}_x = \frac{h}{aq_0} \sigma_x\left(\frac{a}{2}, \frac{b}{2}, \frac{h}{2}\right), \bar{\tau}_{xy} = \frac{h}{aq_0} \tau_{xy}\left(0, 0, \frac{-h}{3}\right), \bar{\tau}_{xz} = \frac{h}{aq_0} \tau_{xz}\left(0, \frac{b}{2}, 0\right)$$

$$, k_w = \frac{K_w a^4}{D}, k_s = \frac{K_s a^2}{D}, D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$$

Tableau II- 1: Propriétés des matériaux utilisées dans la plaque FG.

| Propriétés | Métal<br>Aluminium | Céramique<br>Alumina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) |
|------------|--------------------|--|
| $E$ (GPa)  | 70                 | 380  |
| $\nu$      | 0.3                | 0.3  |

Le Tableau II- 2 représente la flèche maximale, la contrainte normale et les contraintes transversales adimensionnelles d'une plaque carrée FG avec un rapport d'épaisseur  $a/h = 10$ . Il peut être démontré à partir de ces tableaux que les résultats prédits par les HSDT proposés sont en excellent accord avec ceux obtenus à l'aide du modèle SSDT (Zenkour,[18]), (Laoufi et al. [16]) et TSDT (Reddy [17]).

Tableau II- 2: Effets de la variation de la fraction volumique sur les déplacements et les contraintes adimensionnels d'une plaque FGM carrée ( $a/h = 10$ ,  $b = a = 1$ ,  $Kw = Kp = 0$ ,  $q_0 = 1$ ,  $T = C = 0$ )

| $p$       | Modèle               | $\bar{w}$ | $\bar{\sigma}_x$ | $\bar{\tau}_{xy}$ | $\bar{\tau}_{xz}$ |
|-----------|----------------------|-----------|------------------|-------------------|-------------------|
| Céramique | Présente             | 0.29597   | 1.99322          | 0.70682           | 0.23101           |
|           | TSDT( Reddy, 2000)   | 0.294     | 1.98915          | 0.70557           | 0.23778           |
|           | Zankour (2006)       | 0.296     | 1.9955           | 0.7065            | 0.2462            |
|           | Laoufi et al. (2015) | 0.29604   | 2.02724          | 0.70678           | 0.23215           |
| 1         | Présente             | 0.588799  | 3.08315          | 0.611186          | 0.23101           |
|           | TSDT( Reddy, 2000)   | 0.58895   | 3.08501          | 0.61111           | 0.23817           |
|           | Zankour (2006)       | 0.5889    | 3.087            | 0.611             | 0.2462            |
|           | Laoufi et al. (2015) | 0.58893   | 3.12645          | 0.61118           | 0.23215           |
| 2         | Présente             | 0.75696   | 3.60419          | 0.54433           | 0.21066           |
|           | TSDT( Reddy, 2000)   | 0.75747   | 3.60664          | 0.54434           | 0.22568           |
|           | Zankour (2006)       | 0.7573    | 3.6094           | 0.5441            | 0.2265            |
|           | Laoufi et al. (2015) | 0.75718   | 3.63002          | 0.54432           | 0.2119            |
| 5         | Présente             | 0.91037   | 4.24082          | 0.57586           | 0.18434           |
|           | TSDT( Reddy, 2000)   | 0.90951   | 4.24293          | 0.57368           | 0.21609           |
|           | Zankour (2006)       | 0.9118    | 4.2488           | 0.5755            | 0.2017            |
|           | Laoufi et al. (2015) | 0.9108    | 4.20242          | 0.57585           | 0.18575           |
| 6         | Present              | 0.934029  | 4.41601          | 0.580769          | 0.186597          |
|           | Zankour (2006)       | 0.9356    | 4.4244           | 0.5803            | 0.2041            |
|           | Laoufi et al. (2015) | 0.93452   | 4.36696          | 0.58075           | 0.18807           |
| 7         | Présente             | 0.954678  | 4.58872          | 0.583804          | 0.190548          |
|           | Zankour (2006)       | 0.9562    | 4.5971           | 0.5834            | 0.2081            |
|           | Laoufi et al. (2015) | 0.95521   | 4.53333          | 0.58378           | 0.19206           |
| 8         | Présente             | 0.973533  | 4.7577           | 0.586039          | 0.194901          |
|           | Zankour (2006)       | 0.975     | 4.7661           | 0.5856            | 0.2124            |
|           | Laoufi et al. (2015) | 0.97408   | 4.69925          | 0.58602           | 0.19645           |
| 9         | Présente             | 0.99115   | 4.92201          | 0.58796           | 0.19902           |
|           | Zankour (2006)       | 0.9925    | 4.9303           | 0.5875            | 0.2164            |
|           | Laoufi et al. (2015) | 0.9917    | 4.86294          | 0.58794           | 0.20059           |
| 10        | Présente             | 1.00775   | 5.08083          | 0.58981           | 0.20265           |
|           | Zankour (2006)       | 1.0089    | 5.089            | 0.5894            | 0.2198            |
|           | Laoufi et al. (2015) | 1.00832   | 5.02282          | 0.58977           | 0.20424           |
| Métal     | Présente             | 1.60667   | 1.99322          | 0.70682           | 0.23101           |
|           | TSDT( Reddy, 2000)   | 1.59724   | 1.98915          | 0.70557           | 0.23778           |
|           | Zankour (2006)       | 1.607     | 1.9955           | 0.7065            | 0.2462            |
|           | Laoufi et al. (2015) | 1.57882   | 1.89911          | 0.70234           | 0.24229           |

## II.4.2 Etude comparative 2

Dans ce deuxième exemple, une étude comparative est présentée et discutée pour vérifier l'exactitude du modèle proposé en examinant le comportement de flexion des plaques FG sous chargement sinusoïdale et un champ de température et d'humidité. Les caractéristiques du matériau sont fixées dans notre analyse. La température de référence  $T_0 = 25$  °C (température ambiante) et la concentration d'humidité  $C_0 = 0\%$ , comme indiqué au Tableau II- 3.

Le Tableau II- 4 présente la flèche maximale, la contrainte normale et les contraintes transversales adimensionnelles d'une plaque carrée FG avec un rapport d'épaisseur  $a/h = 10$ . Il peut être démontré à partir de ces tableaux que les résultats prédits par les HSDT proposés sont en excellent accord avec ceux obtenus à l'aide de SSDT (Zenkour, 2006 [18]), (Laoufi et al., 2016 [16]) et TSDT (Reddy, 2000 [17]).

Tableau II- 3:Propriétés des matériaux utilisées dans la plaque FG.

| Propriétés                        | Métal (Ti-6Al-4V) | Céramique Dioxyde de Zirconium (ZrO2) |
|-----------------------------------|-------------------|---------------------------------------|
| $E$ (GPa)                         | 66.2              | 117                                   |
| $\nu$                             | 1/3               | 1/3                                   |
| $\alpha$ ( $10^{-6} / ^\circ C$ ) | 10.3              | 7.11                                  |
| $\beta$ ( $\%^{-1}$ )             | 0.33              | 0                                     |

Dans ce qui suit, les quantités adimensionnelles sont définies comme suit :

$$\bar{w} = \frac{10^2 D}{a^4 q_0} w \left( \frac{a}{2}, \frac{b}{2} \right), \quad \bar{\sigma}_x = \frac{1}{10^2 q_0} \sigma_x \left( \frac{a}{2}, \frac{b}{2}, \frac{h}{2} \right), \quad \bar{\tau}_{xy} = \frac{1}{10 q_0} \tau_{xy} \left( 0, 0, \frac{-h}{3} \right),$$

$$\bar{\tau}_{xz} = -\frac{1}{10 q_0} \tau_{xz} \left( 0, \frac{b}{2}, 0 \right), \quad k_w = \frac{K_w a^4}{D}, \quad k_s = \frac{K_s a^2}{D}, \quad D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$$

Tableau II- 4: Effet de la variation de la fraction volumique et des paramètres de fondation élastique sur les déplacements et les contraintes adimensionnels d'une plaque FGM rectangulaire ( $a/h = 10, b = 3a, q_0 = 100, t_1 = t_3 = 0, t_2 = 10, c_1 = c_3 = 0, c_2 = 100$ ).

| $P$       | $k_w$ | $k_p$ | Modèle               | $\bar{w}$            | $\bar{\sigma}_x$ | $\bar{\tau}_{xy}$ | $\bar{\tau}_{xz}$ |          |
|-----------|-------|-------|----------------------|----------------------|------------------|-------------------|-------------------|----------|
| Céramique | 0     | 0     | Présente             | 1.80647              | 0.47165          | 1.55994           | -0.408538         |          |
|           |       |       | Laoufi et al. (2015) | 1.80709              | 0.46227          | 1.5599            | -0.41798          |          |
|           |       |       | TSDT                 | 1.80712              | 0.47187          | 1.55982           | -0.42955          |          |
|           |       |       | SSDT                 | 1.80708              | 0.472            | 1.55975           | -0.44327          |          |
|           | 100   | 0     | Présente             | 0.972134             | -0.027288        | 0.852158          | -0.011384         |          |
|           |       |       | Laoufi et al. (2015) | 0.97215              | -0.02729         | 0.85215           | -0.01164          |          |
|           |       |       | TSDT                 | 0.97216              | -0.0274          | 0.85211           | -0.01197          |          |
|           |       |       | SSDT                 | 0.97216              | -0.0274          | 0.85211           | -0.01235          |          |
|           | 0     | 100   | Présente             | 0.188661             | -0.495817        | 0.187525          | 0.361559          |          |
|           |       |       | Laoufi et al. (2015) | 0.1886               | -0.48723         | 0.18797           | 0.36968           |          |
|           |       |       | TSDT                 | 0.18861              | -0.4957          | 0.18806           | 0.3799            |          |
|           |       |       | SSDT                 | 0.18861              | -0.49588         | 0.1881            | 0.39206           |          |
|           | 100   | 100   | Présente             | 0.173143             | -0.505098        | 0.17436           | 0.368946          |          |
|           |       |       | Laoufi et al. (2015) | 0.17309              | -0.49633         | 0.17482           | 0.37723           |          |
|           |       |       | TSDT                 | 0.17309              | -0.50498         | 0.1749            | 0.38766           |          |
|           |       |       | SSDT                 | 0.17309              | -0.50716         | 0.17495           | 0.40007           |          |
|           | 0.5   | 100   | 100                  | Présente             | 0.18416          | -0.519873         | 0.182428          | 0.422388 |
|           |       |       |                      | Laoufi et al. (2015) | 0.18409          | -0.50982          | 0.18292           | 0.43981  |
|           |       |       |                      | TSDT                 | 0.1841           | -0.51975          | 0.18299           | 0.44334  |
|           |       |       |                      | SSDT                 | 0.18411          | -0.51999          | 0.18301           | 0.45728  |
|           | 1     | 100   | 100                  | Présente             | 0.185098         | -0.514645         | 0.155729          | 0.42383  |
|           |       |       |                      | Laoufi et al. (2015) | 0.18503          | -0.50181          | 0.15622           | 0.4334   |
|           |       |       |                      | TSDT                 | 0.18504          | -0.5145           | 0.15631           | 0.44545  |
|           |       |       |                      | SSDT                 | 0.18504          | -0.51476          | 0.15635           | 0.45984  |
| 2         | 100   | 100   | Présente             | 0.185664             | -0.503584        | 0.133831          | 0.415814          |          |
|           |       |       | Laoufi et al. (2015) | 0.18559              | -0.48892         | 0.13438           | 0.42571           |          |
|           |       |       | TSDT                 | 0.1856               | -0.50336         | 0.13451           | 0.43831           |          |
|           |       |       | SSDT                 | 0.1856               | -0.50363         | 0.13461           | 0.45337           |          |
| 5         | 100   | 100   | Présente             | 0.187038             | -0.489732        | 0.123353          | 0.414022          |          |
|           |       |       | Laoufi et al. (2015) | 0.18696              | -0.47268         | 0.1234            | 0.42443           |          |
|           |       |       | TSDT                 | 0.19696              | -0.4894          | 0.12417           | 0.43754           |          |
|           |       |       | SSDT                 | 0.18694              | -0.48967         | 0.12431           | 0.45322           |          |
| Métal     | 100   | 100   | Présente             | 0.188464             | -0.594955        | 0.120202          | 0.437745          |          |
|           |       |       | Laoufi et al. (2015) | 0.18842              | -0.4228          | 0.12011           | 0.4468            |          |
|           |       |       | TSDT                 | 0.1884               | -0.43095         | 0.12087           | 0.45993           |          |
|           |       |       | SSDT                 | 0.1884               | -0.43117         | 0.12092           | 0.47465           |          |

### II.4.3 Etude paramétrique

Les résultats trouvés du modèle HSDT proposé sont comparés avec ceux rapportés par d'autres modèles de déformation de cisaillement d'ordre élevé, comme indiqué dans les Tableau II- 5 et II-6. Un excellent accord entre les résultats présentés et ceux de la littérature est confirmé ce qui valide l'hypothèse de cette étude. Ces exemples montrent également l'influence de l'indice matériel  $p$ , de la fondation élastique, de l'effet des champs de température et d'humidité sur la flèche et les contraintes adimensionnelles de la plaque FG. Il est important de souligner que les contraintes pour une plaque entièrement en céramique ne sont pas les mêmes que pour une plaque entièrement métallique avec des fondations élastiques. Cela s'explique par le fait que notre plaque est affectée par l'introduction du champ de température. Le nombre d'inconnues primaires dans ce modèle est encore réduit à celui des autres modèles HSDT. On peut conclure que le présent modèle est non seulement précis mais aussi relativement simple et rapide pour prédire le comportement en flexion hygro-thermomécanique des plaques FG reposant sur des fondations élastiques.

Tableau II- 5: Effet de la variation de la fraction volumique et des paramètres de fondation élastique sur les déplacements et les contraintes adimensionnels d'une plaque FGM rectangulaire ( $a/h = 10$ ,  $b = 3a$ ,  $q_0 = 100$ ,  $t_1 = 0$ ,  $t_2 = t_3 = 10$ ,  $c_1 = 0$ ,  $c_2 = c_3 = 100$ )

| $p$     | $k_w$ | $k_p$                | Méthode              | $\bar{w}$ | $\bar{\sigma}_x$ | $\bar{\tau}_{xy}$ | $\bar{\tau}_{xz}$ |
|---------|-------|----------------------|----------------------|-----------|------------------|-------------------|-------------------|
| Ceramic | 0     | 0                    | Présente             | 2.54014   | 0.525163         | 2.20384           | -0.404199         |
|         |       |                      | Laoufi et al. (2015) | 2.54076   | 0.51588          | 2.20381           | -0.41354          |
|         |       |                      | TSDT                 | 2.54076   | 0.52522          | 2.20374           | -0.42454          |
|         |       |                      | SSDT                 | 2.54068   | 0.52552          | 2.20366           | -0.43753          |
|         |       |                      | Présente             | 1.36695   | -0.176414        | 1.20861           | 0.154253          |
|         |       |                      | Laoufi et al. (2015) | 1.36683   | -0.17281         | 1.20872           | 0.15777           |
|         |       |                      | TSDT                 | 1.36682   | -0.17643         | 1.20877           | 0.16257           |
|         |       |                      | SSDT                 | 1.3668    | -0.17649         | 1.20881           | 0.16834           |
|         | 0     | 100                  | Présente             | 0.265285  | -0.835229        | 0.274052          | 0.678662          |
|         |       |                      | Laoufi et al. (2015) | 0.26517   | -0.8191          | 0.27488           | 0.6939            |
|         |       |                      | TSDT                 | 0.26518   | -0.835           | 0.27507           | 0.71354           |
|         |       |                      | SSDT                 | 0.26518   | -0.83531         | 0.27519           | 0.73692           |
|         |       |                      | Présente             | 0.243462  | -0.848278        | 0.25554           | 0.689049          |
|         |       |                      | Laoufi et al. (2015) | 0.24336   | -0.8319          | 0.25639           | 0.70452           |
|         |       |                      | TSDT                 | 0.24336   | -0.84804         | 0.25658           | 0.72442           |
|         |       |                      | SSDT                 | 0.24337   | -0.84835         | 0.2567            | 0.74816           |
|         | 100   | 100                  | Laoufi et al. (2015) | 0.2633    | -0.83867         | 0.23741           | 0.79871           |
|         |       |                      | TSDT                 | 0.2633    | -0.86205         | 0.23762           | 0.82148           |
|         |       |                      | SSDT                 | 0.2633    | -0.86252         | 0.23772           | 0.84866           |
|         |       |                      | Présente             | 0.264093  | -0.841791        | 0.200059          | 0.764692          |
|         |       |                      | Laoufi et al. (2015) | 0.26396   | -0.81483         | 0.20107           | 0.78289           |
|         |       |                      | TSDT                 | 0.26396   | -0.84138         | 0.20133           | 0.80652           |
|         |       |                      | SSDT                 | 0.26395   | -0.84185         | 0.20154           | 0.83484           |
|         |       |                      | Présente             | 0.266174  | -0.818065        | 0.183053          | 0.759403          |
| 5       | 100   | Laoufi et al. (2015) | 0.26603              | -0.78678  | 0.18423          | 0.77849           |                   |
|         |       | TSDT                 | 0.26601              | -0.81745  | 0.18459          | 0.80297           |                   |
|         |       | SSDT                 | 0.266                | -0.81792  | 0.18486          | 0.8323            |                   |
|         |       | Présente             | 0.267874             | -0.985018 | 0.181616         | 0.799027          |                   |
| Metal   | 100   | Laoufi et al. (2015) | 0.26729              | -0.77772  | 0.18167          | 0.79866           |                   |
|         |       | TSDT                 | 0.26774              | -0.71656  | 0.18286          | 0.84003           |                   |
|         |       | SSDT                 | 0.26775              | -0.71694  | 0.18298          | 0.86748           |                   |
|         |       | Présente             | 0.26775              | -0.71694  | 0.18298          | 0.86748           |                   |

Tableau II- 6: Effet du rapport d'élancement des paramètres de fondation élastique sur la déflexion adimensionnelle d'une plaque FGM carrée ( $q_0=100, t1=0, t2=t3=10, c1=0, c2=c3=100$ )

| $p$       | $k_w$ | $k_p$ | $a/h$    |          |           |           |
|-----------|-------|-------|----------|----------|-----------|-----------|
|           |       |       | 5        | 10       | 20        | 50        |
| Céramique | 0     | 0     | 4.0497   | 1.206    | 0.494059  | 0.294638  |
|           | 100   | 0     | 3.07714  | 0.948305 | 0.391973  | 0.23435   |
|           | 0     | 100   | 0.559442 | 0.189501 | 0.0804538 | 0.0484757 |
|           | 100   | 100   | 0.536037 | 0.18174  | 0.0771806 | 0.0465072 |
| 1         | 0     | 0     | 5.3187   | 1.58389  | 0.648419  | 0.386365  |
|           | 100   | 0     | 3.76592  | 1.1683   | 0.483434  | 0.288933  |
|           | 0     | 100   | 0.581976 | 0.197448 | 0.0838112 | 0.0504632 |
|           | 100   | 100   | 0.556854 | 0.189065 | 0.0802706 | 0.0483342 |
| 2         | 0     | 0     | 5.58968  | 1.66861  | 0.685656  | 0.410235  |
|           | 100   | 0     | 3.87378  | 1.20963  | 0.502976  | 0.301946  |
|           | 0     | 100   | 0.573678 | 0.196544 | 0.08393   | 0.0507766 |
|           | 100   | 100   | 0.548733 | 0.188137 | 0.0803575 | 0.0486187 |
| 3         | 0     | 0     | 5.72589  | 1.71031  | 0.703206  | 0.420981  |
|           | 100   | 0     | 3.92709  | 1.23013  | 0.512163  | 0.307702  |
|           | 0     | 100   | 0.570219 | 0.196474 | 0.0840838 | 0.0509238 |
|           | 100   | 100   | 0.545342 | 0.188043 | 0.0804938 | 0.0487525 |
| 4         | 0     | 0     | 5.82242  | 1.73958  | 0.715375  | 0.428339  |
|           | 100   | 0     | 3.96619  | 1.24461  | 0.518504  | 0.311605  |
|           | 0     | 100   | 0.568694 | 0.196565 | 0.0842131 | 0.0510253 |
|           | 100   | 100   | 0.543835 | 0.188111 | 0.0806106 | 0.0488454 |
| 5         | 0     | 0     | 5.89976  | 1.76305  | 0.725206  | 0.434346  |
|           | 100   | 0     | 3.99829  | 1.25615  | 0.523574  | 0.314763  |
|           | 0     | 100   | 0.567978 | 0.567978 | 0.0843094 | 0.0511038 |
|           | 100   | 100   | 0.543114 | 0.188178 | 0.0806969 | 0.0489171 |
| Metal     | 0     | 0     | 6.82003  | 2.04726  | 0.85215   | 0.517368  |
|           | 100   | 0     | 4.37574  | 1.38303  | 0.583543  | 0.355662  |
|           | 0     | 100   | 0.567094 | 0.195342 | 0.0844888 | 0.051868  |
|           | 100   | 100   | 0.541922 | 0.186784 | 0.0808012 | 0.0496067 |

Les Figure II- 2 Figure II- 3 présentent la variation de la flèche maximale adimensionnelle  $\bar{w}$  par rapport à l'épaisseur, aux rapports d'élancement  $a/h$  et aux rapports d'aspect des plaques  $a/b$  respectivement. On peut voir que la flèche est maximale pour la plaque entièrement métallique et devient minimale pour la plaque céramique indépendamment des valeurs de température, d'humidité et de coefficient de fondation élastique. Il est évident que pour les

plaques FG, les valeurs des flèches sont comprises entre celles des plaques entièrement métalliques et entièrement céramiques. En outre, la flexion est augmentée avec l'absence de la fondation élastique et l'influence de la charge d'humidité est moins importante à celle de la température.

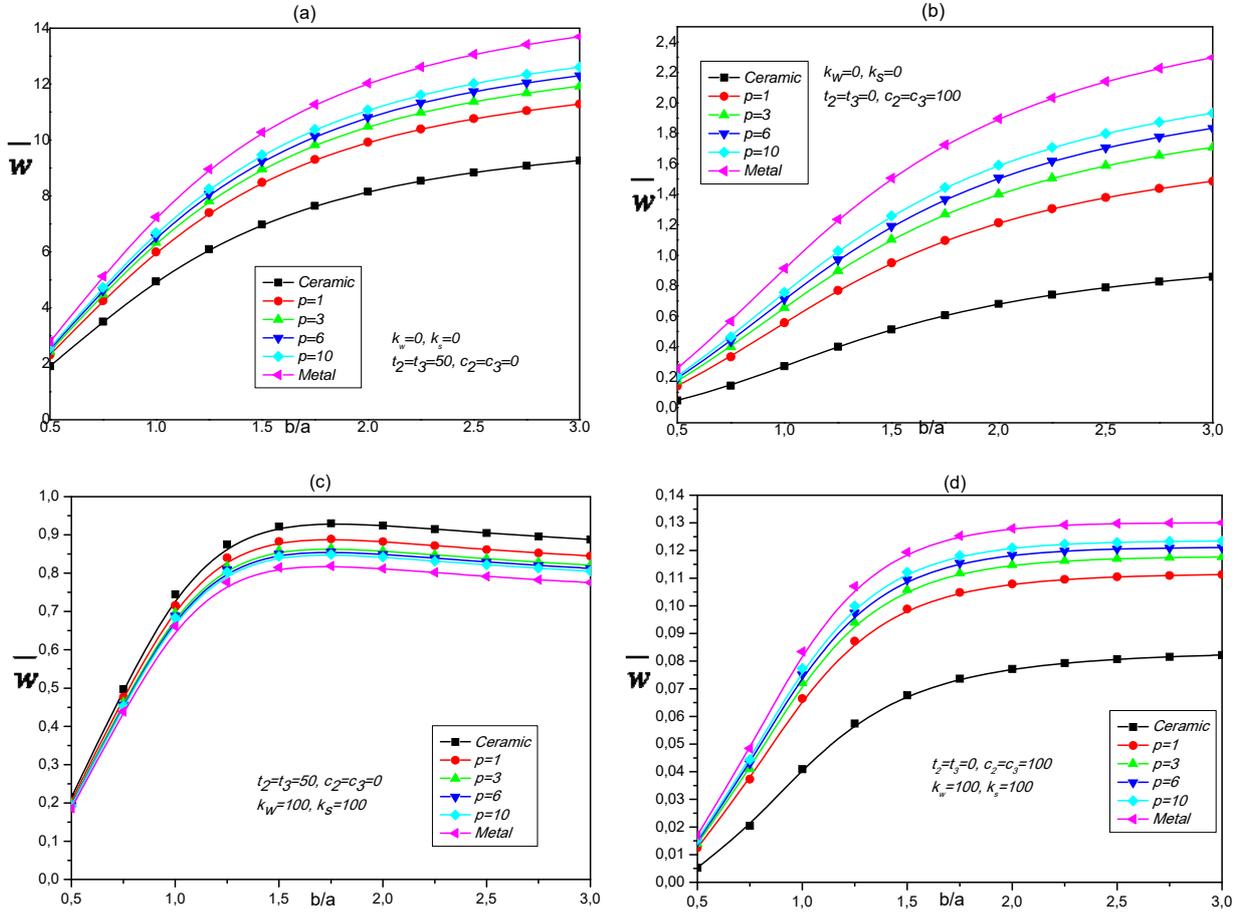


Figure II- 2: La flèche maximale  $\bar{w}$  adimensionnelle pour différents rapports d'aspect  $b/a$  de plaque FG reposant sur des fondations élastiques de type Winkler-Pasternak ( $a/h = 10$ ).

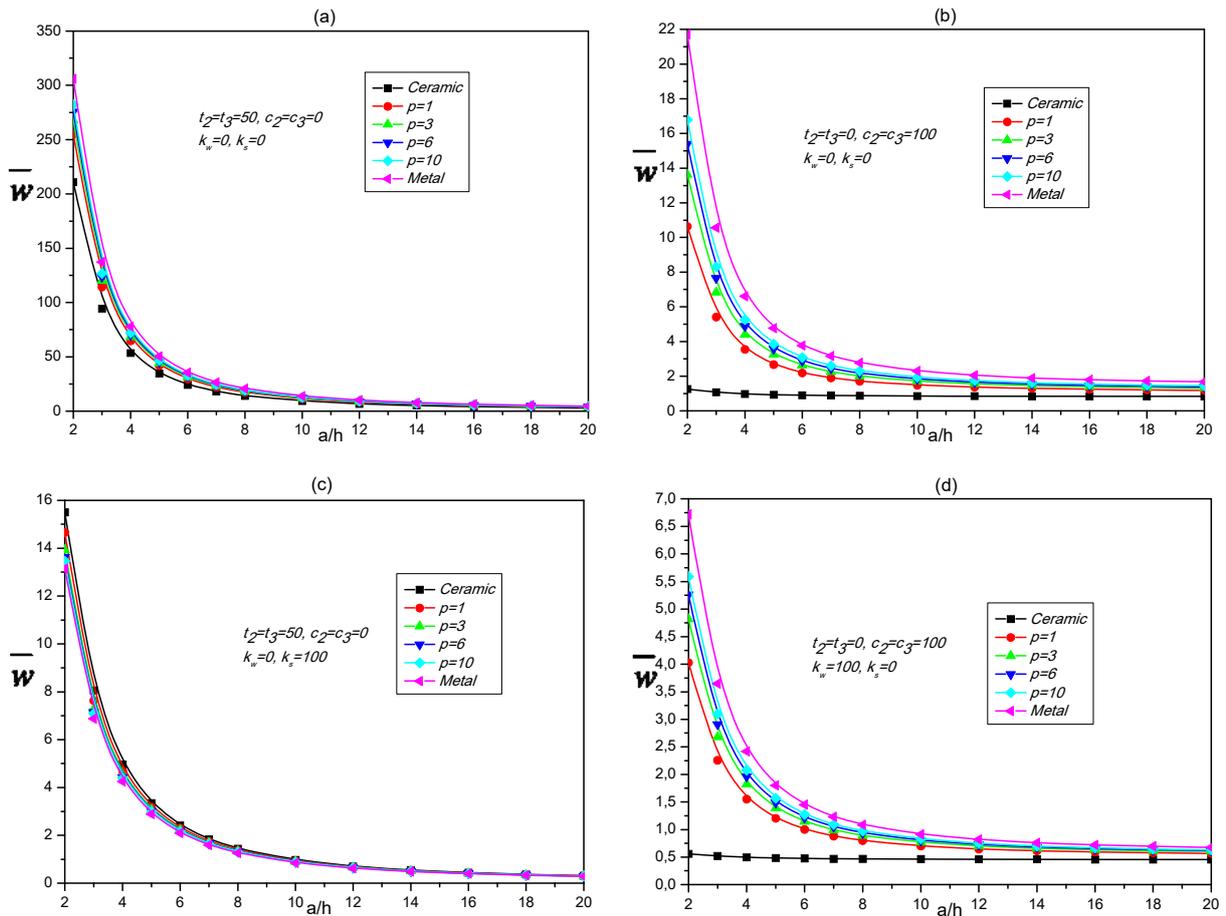


Figure II- 3: La flèche centrale  $\bar{w}$  adimensionnelle pour différents rapports d'élanement  $a/h$  pour une plaque FG reposant sur des fondations élastiques de type Winkler-Pasternak

Les Figure II- 4, Figure II- 5 et Figure II- 6 présentent les variations à travers l'épaisseur de la contrainte axiale adimensionnelle  $\bar{\sigma}_x$ , la contrainte longitudinale de cisaillement adimensionnelle  $\bar{\tau}_{xy}$  et la contrainte transversale de cisaillement adimensionnelle  $\bar{\tau}_{xz}$ , des plaques rectangulaires FG qui reposent sur des fondations élastiques pour différentes valeurs d'humidité et de température. Dans ces figures, il est considéré, que  $q_0 = 100 \text{ GPa}$ ,  $a/h = 10$ ,  $b/a = 3$ , et  $p = 2$ . Comme il est indiqué aux **Figure II- 4** et **Figure II- 5**, les contraintes maximales de compression se trouvent à un point de la surface supérieure tandis que les contraintes maximales de traction sont localisées, bien sûr, à un point sur la surface inférieure des plaques FG. On peut observer que les contraintes de cisaillement augmentent avec l'augmentation de la charge thermique et d'humidité. Par ailleurs la valeur maximale de ces dernières se situe à un point au-dessus du milieu du plan de la plaque FG.

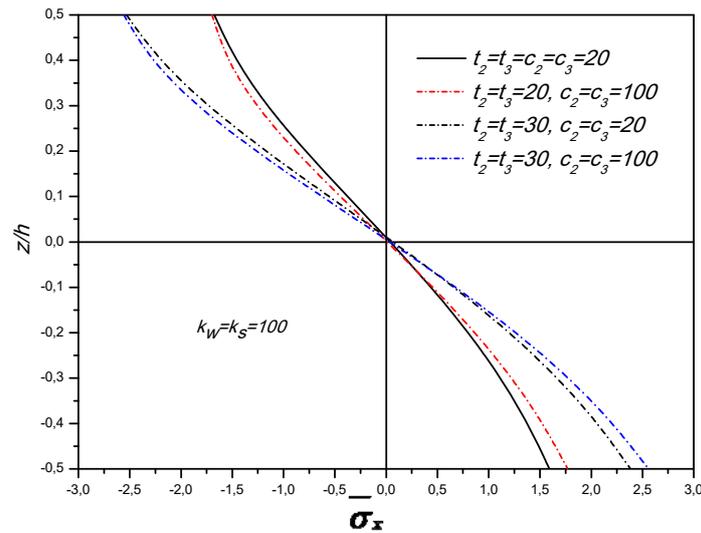


Figure II- 4: Evolution de la contrainte axiale adimensionnelle  $\bar{\sigma}_x$  à travers l'épaisseur d'une plaque FG rectangulaire qui repose sur des fondations élastiques pour différentes valeurs d'humidité et de température ( $a/h = 10, b/a = 3, p = 2$ )

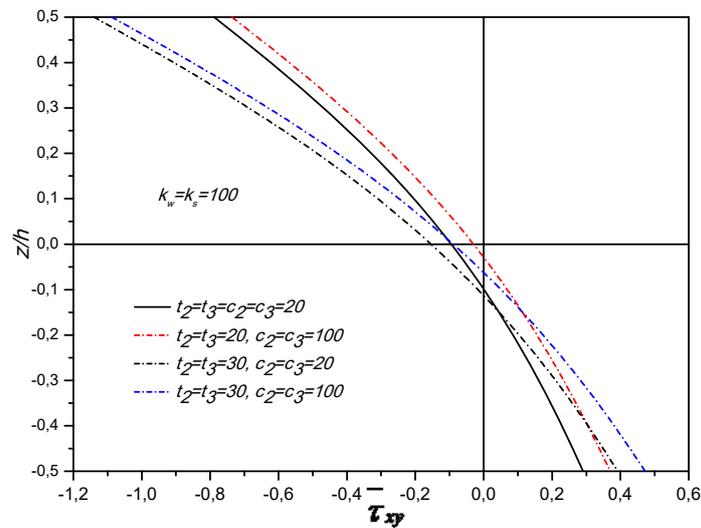


Figure II- 5: Evolution de la contrainte longitudinale de cisaillement adimensionnelle  $\bar{\tau}_{xy}$  à travers l'épaisseur d'une plaque FG rectangulaire reposant sur des fondations élastiques pour différentes valeurs d'humidité et de température ( $a/h = 10, b/a = 3, p = 2$ ).

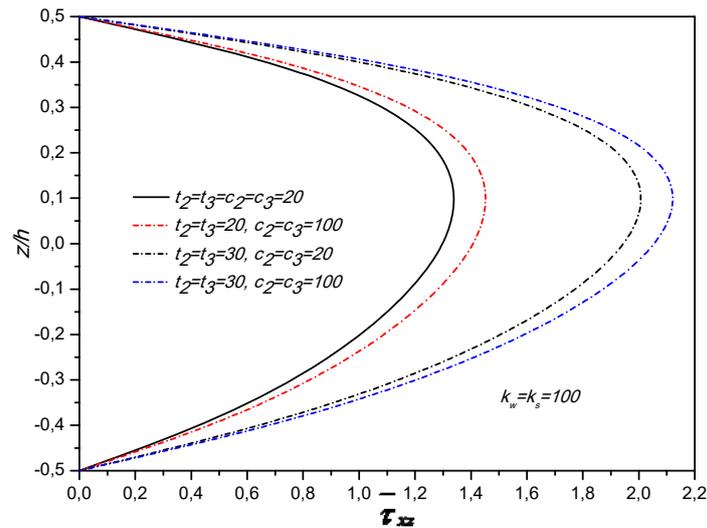


Figure II- 6: Evolution de la contrainte de cisaillement transversal adimensionnelle  $\bar{\tau}_{xz}$  à travers l'épaisseur d'une plaque FG rectangulaire reposant sur des fondations élastiques pour différentes valeurs d'humidité et de températures ( $a/h = 10, b/a = 3, p = 2$ ).

Les Figure II- 7, Figure II- 8, Figure II- 9 et Figure II- 10 représentent la relation entre la flèche  $\bar{w}$ , la contrainte axiale  $\bar{\sigma}_x$ , la contrainte longitudinale de cisaillement  $\bar{\tau}_{xy}$ , la contrainte transversale de cisaillement  $\bar{\tau}_{xz}$  adimensionnelle et le rapport d'aspect de plaque pour trois cas du chargement thermique et d'humidité. On peut voir à partir de ces résultats que les trois cas considérés de charges de température et d'humidité donnent presque les mêmes valeurs de flèche  $\bar{w}$ , de contrainte axiale  $\bar{\sigma}_x$ , de contrainte longitudinale de cisaillement  $\bar{\tau}_{xy}$  et de contrainte transversale de cisaillement  $\bar{\tau}_{xz}$  adimensionnelle. De plus, la variation sinusoïdale fournit une valeur intermédiaire dans les cas de déflexion et de contrainte.

La variation cubique donne des valeurs relativement plus grandes que celles des deux autres variations de température et d'humidité dans les cas de déflexion et de contrainte longitudinale de cisaillement. Contrairement aux cas de contrainte de cisaillement axial et transversal, la variation exponentielle fournit des valeurs plus importantes relativement à celles des deux autres distributions.

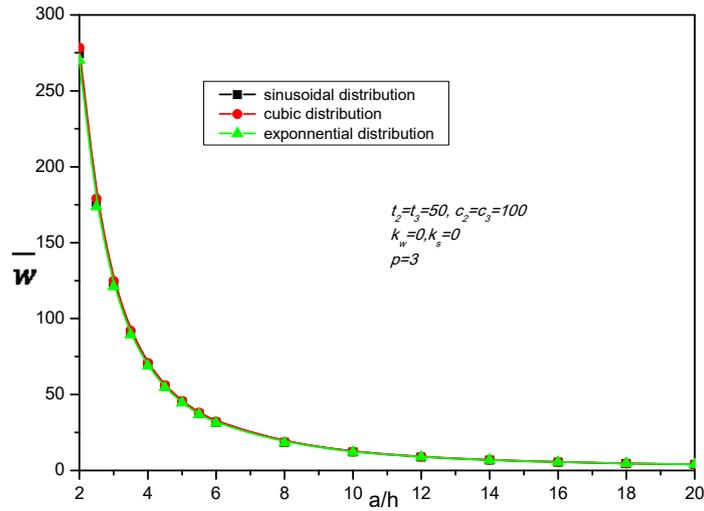


Figure II- 7: Flèche maximale adimensionnelle  $\bar{w}$  par rapport aux différents rapports d'élanement  $a/h$  d'une plaque FG rectangulaire, pour différentes distributions de température et de concentration d'humidité  $\bar{\Psi}(z)$  ( $b/a = 3, p = 2$ )

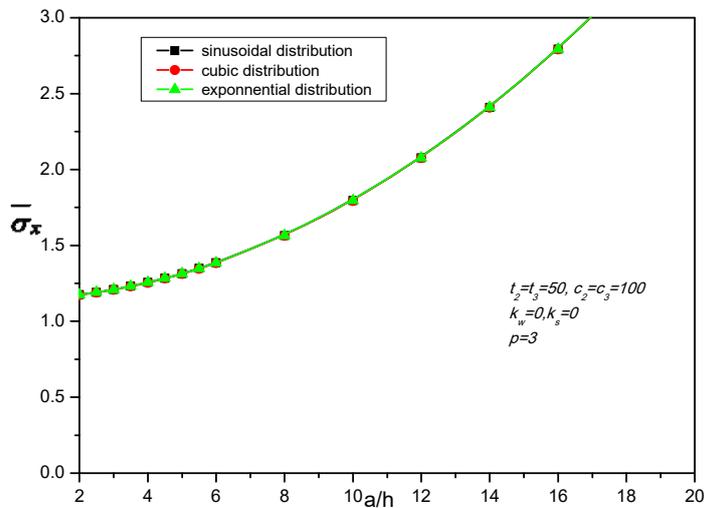


Figure II- 8: Contrainte axiale adimensionnelle  $\bar{\sigma}_x$  par rapport aux différents rapports d'élanement  $a/h$  d'une plaque FG rectangulaire, pour différentes distributions de température et de concentration d'humidité  $\bar{\Psi}(z)$  ( $b/a = 3, p = 2$ ).

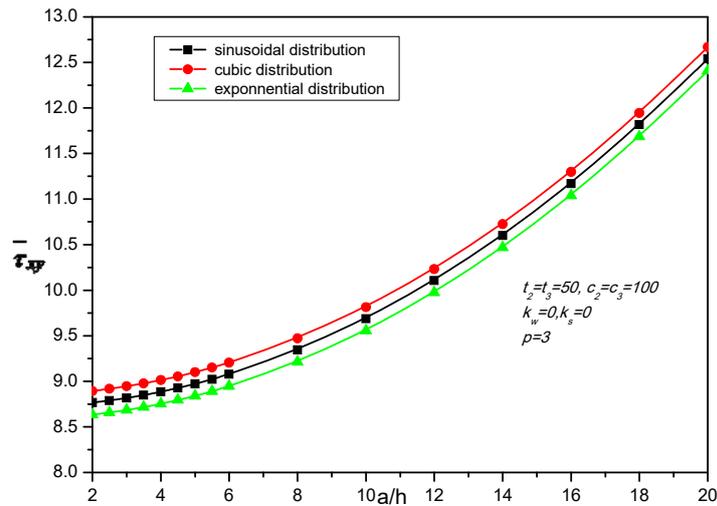


Figure II- 9: Contrainte longitudinale de cisaillement adimensionnelle  $\bar{\tau}_{xy}$  par rapport aux différents rapports d'élancement  $a/h$  d'une plaque FG rectangulaire, pour différentes distributions de température et de concentration d'humidité  $\bar{\Psi}(z)$  ( $b/a = 3, p = 2$ ).

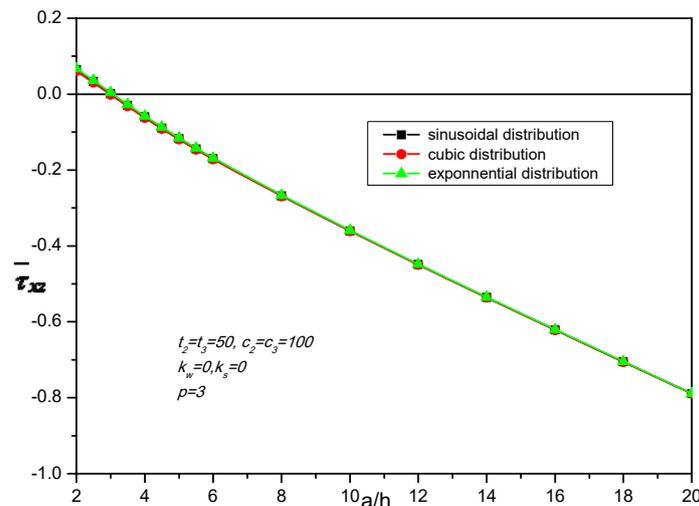


Figure II- 10: Contrainte de cisaillement transversal  $\bar{\tau}_{xz}$  par rapport aux différents rapports d'élancement  $a/h$  d'une plaque FG rectangulaire, pour différentes distributions de température et de concentration d'humidité  $\bar{\Psi}(z)$  ( $b/a = 3, p = 2$ ).

Les variations adimensionnelles de la déflexion centrale  $\bar{w}$ , la contrainte de cisaillement dans le plan  $\bar{\tau}_{xy}$ , la contrainte transversale de cisaillement  $\bar{\tau}_{xz}$  par rapport au rapport d'aspect de la plaque  $b/a$  pour différentes valeurs  $E_m/E_c$  avec ou sans influences hygrothermique sont

présentées aux Figure II- 11, Figure II- 12, Figure II- 13, Figure II- 14, Figure II- 15, Figure II- 16, Figure II- 17 et Figure II- 18.

La déflexion, la contrainte axiale et transversale augmentent avec l'augmentation du rapport d'aspect de la plaque  $b/a$ , et ces quantités prennent les valeurs maximales pour  $E_m/E_c = 0.03$  et minimales pour  $E_m/E_c = 1$  comme démontré sur les Figure II- 11, Figure II- 12, Figure II- 14, Figure II- 15 et Figure II- 18. On peut voir que lorsque les effets hygrothermiques ne sont pas pris en considération, la contrainte de cisaillement dans le plan augmente avec l'augmentation du rapport d'aspect en dessous d'une valeur seuil de 1,75. Toutefois, lorsque le rapport  $b/a$  est supérieur à 1,75, la contrainte de cisaillement dans le plan diminue lorsqu'on augmente le rapport d'aspect comme indiqué à la Figure II- 13. Dans le cas où les effets hygrothermiques sont considérés, on peut observer que la contrainte de cisaillement dans le plan augmente avec l'augmentation du rapport d'aspect  $b/a$  en dessous de 1,0. Cependant, quand on dépasse cette valeur seuil de 1,0 la contrainte de cisaillement dans le plan est réduite avec l'augmentation du rapport d'aspect. Pour les deux cas avec ou sans examen des effets hygrothermiques, la contrainte de cisaillement dans le plan est maximale pour  $E_m/E_c = 1$  et minimale pour  $E_m/E_c = 0.03$ , comme indiqué aux Figure II- 13 et Figure II- 17.

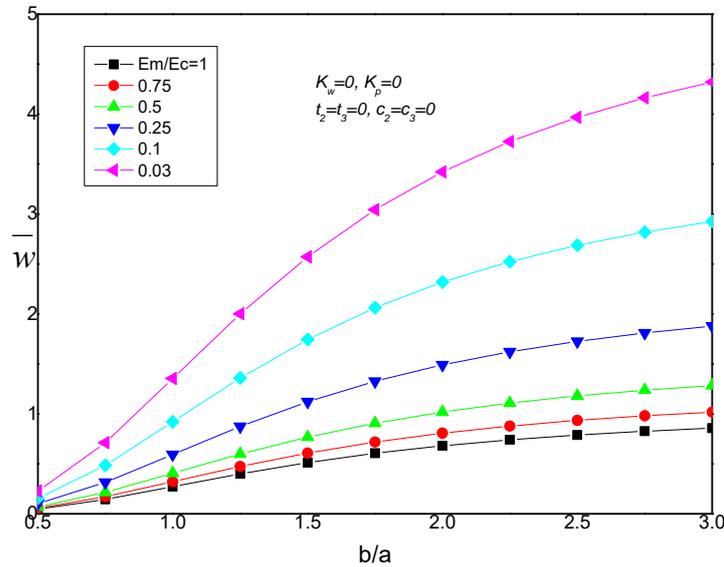


Figure II- 11: Flèche maximale adimensionnelle  $\bar{w}$  en fonction du rapport d'aspect  $b/a$  d'une plaque FG rectangulaire pour différents rapports  $E_m/E_c$  ( $a/h=10, p=2$ )

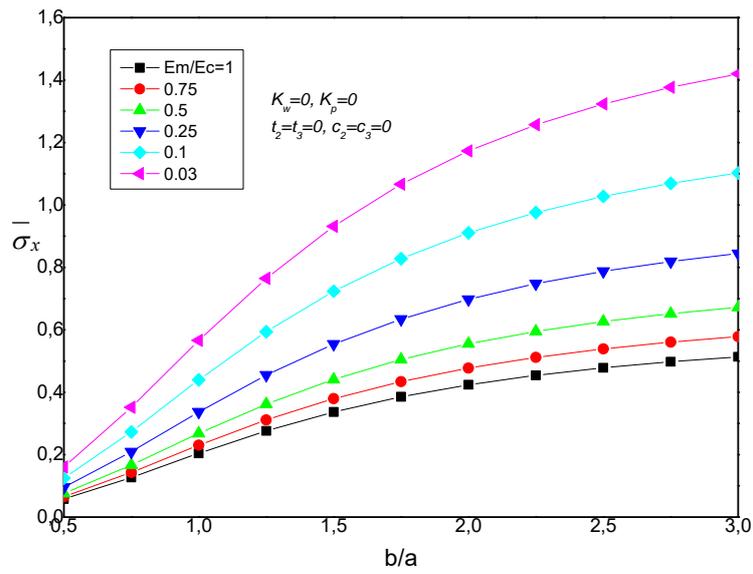


Figure II- 12: Contrainte axiale adimensionnelle  $\bar{\sigma}_x$  en fonction du rapport d'aspect  $b/a$  d'une plaque FG rectangulaire pour différents rapports  $E_m/E_c$  ( $a/h=10, p=2$ )

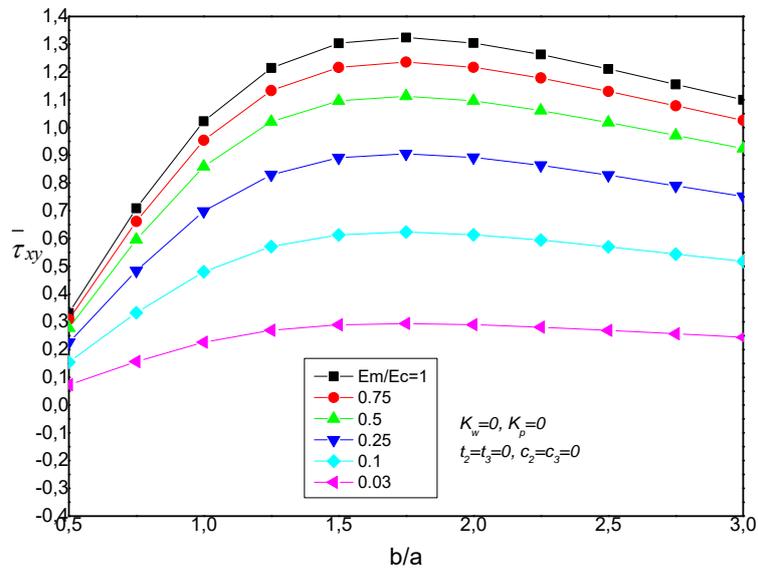


Figure II- 13: Contrainte axiale adimensionnelle  $\bar{\tau}_{xy}$  en fonction du rapport d'aspect  $b/a$  d'une plaque FG rectangulaire pour différents rapports  $E_m/E_c$  ( $a/h=10, p=2$ )

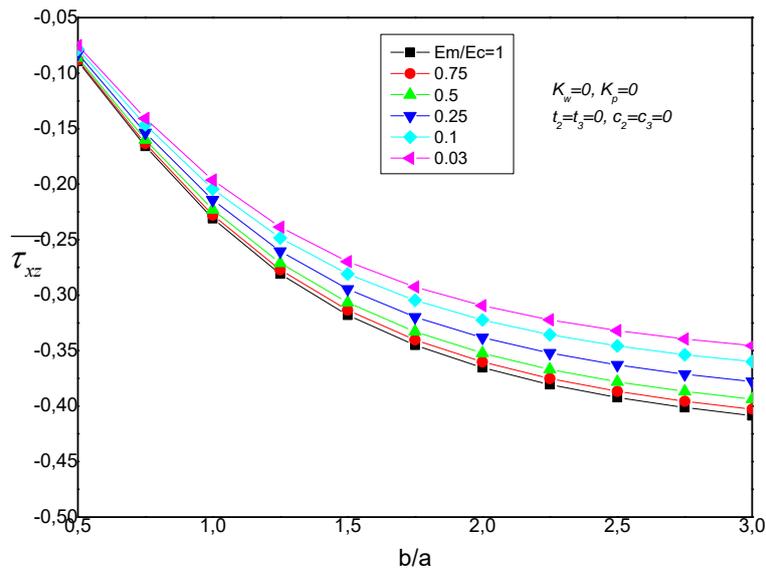


Figure II- 14: Contrainte de cisaillement transversale adimensionnelle  $\bar{\tau}_{xz}$  en fonction du rapport d'aspect  $b/a$  d'une plaque FG rectangulaire pour différents rapports  $E_m/E_c$  ( $a/h=10, p=2$ )

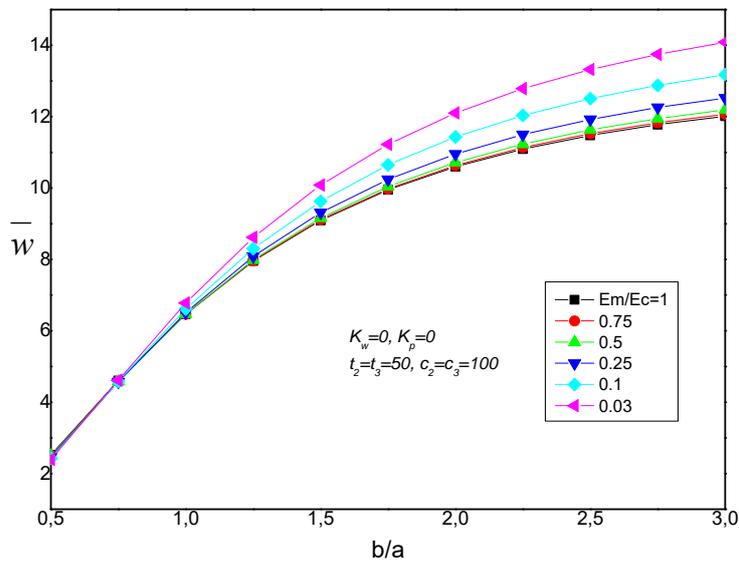


Figure II- 15: Flèche maximale adimensionnelle  $\bar{w}$  en fonction du rapport d'aspect  $b/a$  d'une plaque FG pour différents rapports  $E_m/E_c$  ( $a/h=10, p=2$ )

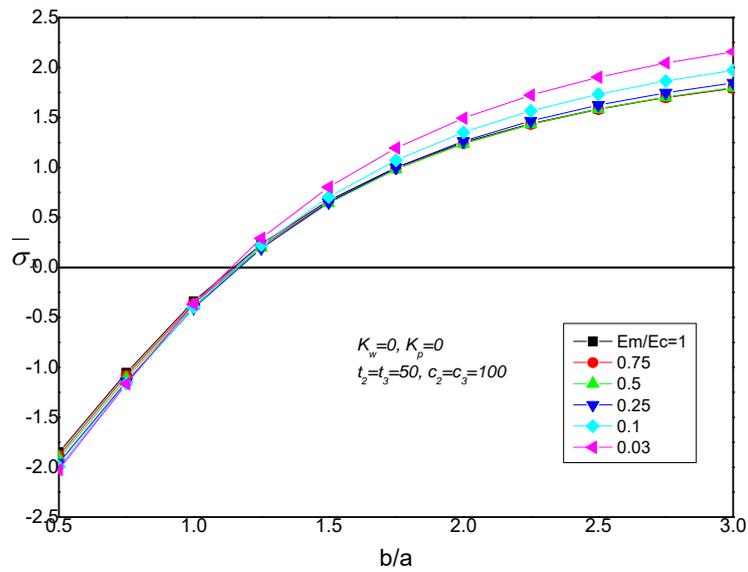


Figure II- 16: Contrainte axiale adimensionnelle  $\bar{\sigma}_x$  en fonction du rapport d'aspect  $b/a$  d'une plaque FG pour différents rapports  $E_m / E_c$  ( $a/h=10, p=2$ )

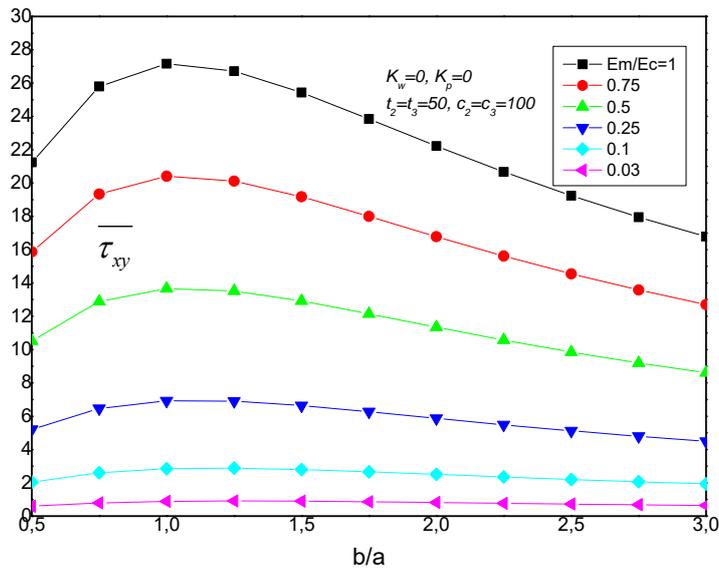


Figure II- 17: Contrainte longitudinale de cisaillement adimensionnel  $\bar{\tau}_{xy}$  en fonction du rapport d'aspect  $b/a$  d'une plaque FG pour différents rapports  $E_m / E_c$  ( $a/h=10, p=2$ )

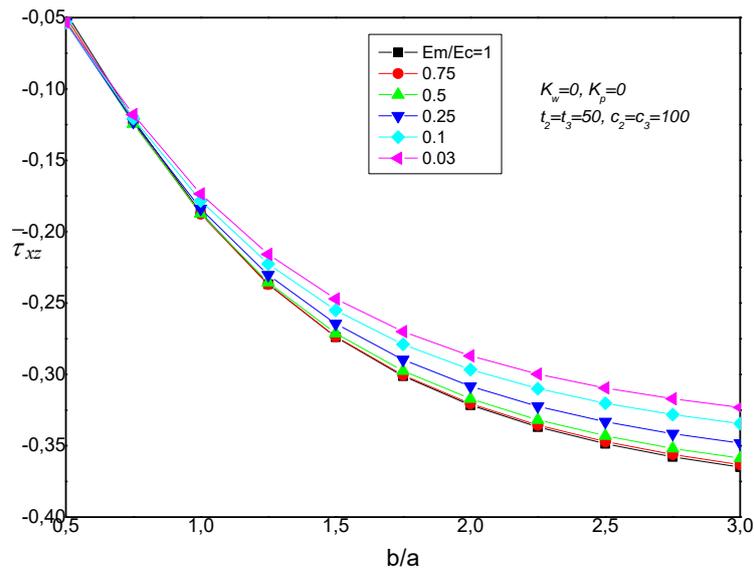


Figure II- 18: Contrainte de cisaillement transversal stress  $\bar{\tau}_{xz}$  en fonction du rapport d'aspect  $b/a$  d'une plaque FG pour différents rapports  $E_m/E_c$  ( $a/h=10, p=2$ )

## II.5 Conclusion

Cette étude présente une analyse hydro thermomécanique des plaques FG. Le modèle proposé prend en compte l'effet de cisaillement de la section transversale. Il se base sur la théorie d'ordre élevé HSDT avec 4 paramètres. En effet, la réduction des paramètres permet non seulement de réduire le cout de calcul mais aussi à avoir une précision. Lors de cette investigation, des études comparatives et paramétriques ont été entreprises, et les résultats ont été comparés avec les solutions de plusieurs modèles connues dans la littérature. Ils démontrent que le modèle proposé peut prédire avec précision le comportement hydro-thermomécanique de la plaque FG. Par la suite, nous avons présenté des exemples illustrant les effets de concentration d'humidité et de température sur le comportement mécanique des plaques FG.

**Références bibliographiques**

- [1] K. Swaminathan and D. T. Naveenkumar, “Higher order refined computational models for the stability analysis of FGM plates: Analytical solutions,” *Eur. J. Mech. A/Solid.*, vol. 47, pp. 349–361, 2014.
- [2] K. Darilmaz, “Vibration analysis of functionally graded material (FGM) grid systems,” *Steel Compos. Struct., Int. J.*, vol. 18, no. 2, pp. 395–408, 2015.
- [3] V. R. Kar and S. K. Panda, “Nonlinear flexural vibration of shear deformable functionally graded spherical shell panel,” *Steel Compos. Struct., Int. J.*, vol. 18, no. 3, pp. 693–709, 2015.
- [4] L. Hadji and E. A. Adda Bedia, “Analyse of the behavior of Functionally graded beams based on neutral surface position,” *Struct. Eng. Mech., Int. J.*, vol. 55, no. 4, pp. 703–717, 2015.
- [5] S. Ait Yahia, H. Ait Atmane, M. S. A. Houari, and A. Tounsi, “Wave propagation in functionally graded plates with porosities using various higher-order shear deformation plate theories,” *Struct. Eng. Mech., Int. J.*, vol. 53, no. 6, pp. 1143–1165, 2015.
- [6] S. S. Akavci, “An efficient shear deformation theory for free vibration of functionally graded thick rectangular plates on elastic foundation,” *Compos. Struct.*, vol. 108, pp. 667–676, 2015.
- [7] X. D. Zhang, D. Q. Liu, and C. Ge, “Thermal stress analysis of axial symmetry functionally gradient materials under steady temperature field,” *J. Funct. Grad. Mater.*, vol. 25, pp. 452–455, 1994.
- [8] J. N. Reddy and Z. Q. Cheng, “Three-dimensional thermomechanical deformations of functionally graded rectangular plates,” *Eur. J. Mech. A/Solids*, vol. 20, pp. 841–855, 2001.
- [9] K. M. Liew, S. Kitipornchai, X. Z. Zhang, and C. W. Lim, “Analysis of the thermal stress behaviour of functionally graded hollow circular cylinders,” *Int. J. Solids Struct.*, vol. 40, pp. 2355–2380, 2003.
- [10] S. S. Vel and R. C. Batra, “Three-dimensional analysis of transient thermal stresses in functionally graded plates,” *Int. J. Solids Struct.*, vol. 40, pp. 7181–7196, 2003.
- [11] K. K. Shukla, K. V. R. Kumar, R. Pandey, and Y. Nath, “Postbuckling response of functionally graded rectangular plates subjected to thermo-mechanical loading,” *Int. J. Struct. Stab. Dynam.*, vol. 7, no. 3, pp. 519–541, 2007.
- [12] F. Boukhelf, M. B. Bouiadjra, M. Bouremana, and A. Tounsi, “Hygro-thermo-mechanical bending analysis of FGM plates using a new HSDT,” *Smart Struct. Syst.*,

- vol. 21, no. 1, pp. 75–97, 2018.
- [13] B. Boudierba, M. Houari, and A. Tounsi, “Thermomechanical bending response of FGM thick plates resting on Winkler-Pasternak elastic foundations,” *Steel Compos Struct*, vol. 14, no. 1, pp. 85–104, 2013.
- [14] M. Sobhy, “Thermoelastic response of FGM plates with temperature-dependent properties resting on variable elastic foundations,” *Int. J. Appl. Mech.*, vol. 7, p. 1550082, 2015.
- [15] J. . Lions, *Contrôle optimal de systèmes gouvernés par des équations aux dérivées partielles*, Paris : Dunod : Gauthier-Villars. 1968.
- [16] I. Laoufi, M. Ameer, M. Zidi, E. A. Adda Bedia, and A. A. Bousahla, “Mechanical and hygrothermal behaviour of functionally graded plates using a hyperbolic shear deformation theory,” *Steel Compos. Struct.*, vol. 20, no. 4, pp. 889–911, 2016.
- [17] J. N. Reddy, “Analysis of functionally graded plates,” *Int. J. Numer. Method. Eng.*, vol. 47, no. 1–3, pp. 663–684, 2000.
- [18] A. M. Zenkour, “Generalized shear deformation theory for bending analysis of functionally graded plates,” *Appl. Math. Model.*, vol. 30, no. 1, pp. 67–84, 2006.
- [19] M. Zidi, A. Tounsi, M. S. A. Houari, E. A. Adda Bedia, and O. A. Bég, “Bending analysis of FGM plates under hygro-thermo-mechanical loading using a four variable refined plate theory,” *Aerosp. Sci. Technol.*, vol. 34, pp. 24–34, 2014.

**CHAPITRE III. ETAT DE L'ART SUR LES ECO-  
BETONS ET LES TRANSFERTS HYGROTHERMIQUES  
DANS UN MILIEU POREUX**

### **III.1 Introduction**

Ce chapitre présente une synthèse des travaux de la littérature portant sur notre thème de recherche. Il se décline en trois volets complémentaires :

Le premier, traite des différents éco-matériaux développés dans cette étude. Les moyens et techniques pour la caractérisation des principales propriétés de ces matériaux seront présentés. De plus, une synthèse des résultats mettant en exergue l'influence de l'ajout des déchets de verre sur les propriétés physiques, mécaniques, thermiques, et hydriques des matériaux sera entreprise. Lors du deuxième volet, une caractérisation des propriétés des milieux poreux ainsi que les mécanismes de transferts de chaleur et de masse au sein des milieux poreux seront développées. Le dernier porte sur les modèles numériques de prédictions des transferts hygrothermiques ainsi que les plateformes expérimentales de validation rencontrées dans la littérature.

### **III.2 Contexte général sur la valorisation des déchets dans les bétons**

L'objectif recherché lors de la valorisation des déchets est de trouver une formulation de béton à faible impact environnemental à travers l'incorporation de déchets non biodégradables dans le béton (l'utilisation de déchets de verre comme remplacement partiel du ciment) afin de pérenniser et préserver les ressources naturelles, en limitant l'épuisement des ressources ainsi que les émissions de GES. En effet, les taux des émissions mondiales de CO<sub>2</sub> pour tous les secteurs d'activité sont illustrés dans la figure 1 (SOeS, 2015)[13]. Il est clair que le bâtiment, ses besoins en énergie (électricité et chaleur) sont l'un des secteurs les plus gourmands en demande énergétique finale. De ce fait est né une grande volonté de réduire les dépenses énergétiques. L'étude de l'influence des granulats et des verres recyclés sur les propriétés des bétons peut contribuer à réduire ses dépenses dans les secteurs de l'industrie, transports, énergie et UTFC (Utilisation des terres, leurs changement et la forêt) (cf. Figure 1). Par ailleurs, l'humidité constitue une des causes majeures de dégradation des bâtiments puisqu'elle est le vecteur de transport d'agents agressifs tels que les chlorures ou les sulfates et le siège de réactions lors de la carbonatation. Nous nous sommes penchés sur cette problématique, en intégrant les déchets de verre, où ce dernier joue le rôle du tampon hydrique d'après ses propriétés intrinsèques.

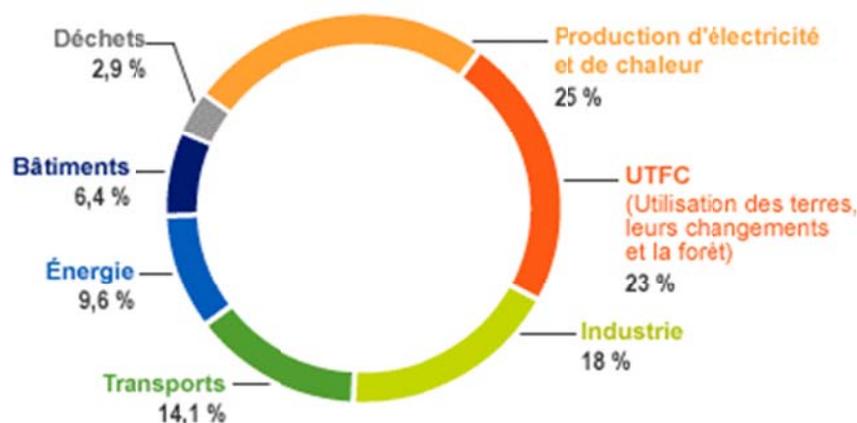


Figure III-1 : Répartition des émissions mondiales par secteur d'activité en 2010 (chiffres clés du climat France et Monde édition 2015, SOeS)[13]

### III.2.1 Le recyclage du verre

Le verre est considéré comme le remplacement le plus approprié de l'agrégat en raison de ses caractéristiques physiques et de sa composition chimique (Tan, K, *et al.*, 2013)[5]. Le verre est très rigide et durable. Finement broyé, il peut servir de matière pouzzolanique, le rendant ainsi approprié pour l'usage comme remplacement partiel du ciment et de l'agrégat fin. Le remplacement partiel améliore également les propriétés à l'état frais du béton, ainsi il peut être employé pour confectionner des bétons à haute résistance sans employer d'autres super plastifiants (Meyer C, *et al.*, 2001)[14]. En raison de la disponibilité de différentes couleurs attrayantes, le verre peut fournir également un aspect esthétique. En outre, le recyclage du verre rend l'incinération bon marché, permet d'économiser beaucoup d'espace d'enfouissement et de réduire les gaz à effet de serre produits à partir de la fabrication du ciment. Le recyclage du verre dans la construction a été étudié depuis une demi-décennie maintenant. Plusieurs recherches ont été effectuées pour tester les applications du verre dans le béton en remplacement partiel du ciment et des agrégats fins (M. Adaway *et al.*, 2015 [6] ; Najib N. G *et al.*, 2018 [7]). Le choix des proportions (verre/ agrégats fins) est proposé par (M. Adaway, *et al.*, 2015 [6]), Ce dernier a montré que la résistance à la compression augmentait avec l'ajout du verre jusqu'à 30%. Au-delà de cette valeur, il y avait un impact négatif sur la résistance et sur le développement de la résistance comme montré sur la Figure III-3. Ceci peut être expliqué, dans les quantités plus grandes, la nature angulaire de l'agrégat de verre augmente la surface de contact avec la pâte de ciment disponible et conduit à la formation de vides microscopiques dans la matrice de béton causés par la réaction alcali-silice (RAS).

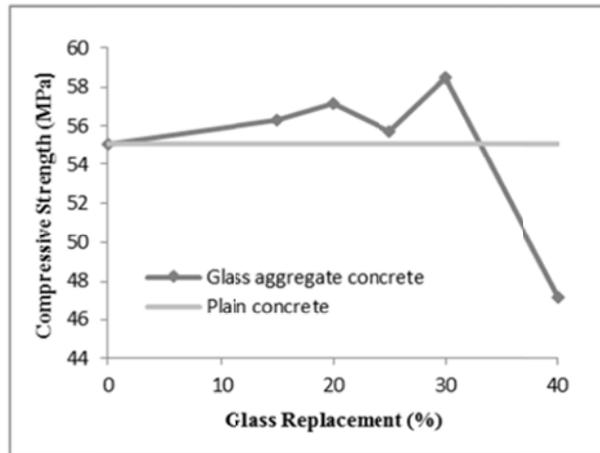


Figure III-2 : Comparaison de la résistance à la compression à 28 jours entre le béton témoin et le béton de granulats de verre (M. Adaway, et al., 2015)[6]

Les résultats des essais de résistance à la compression à 28 jours de durcissement, (M. Adaway *et al.*, 2015)[6], sont illustrés sur la Figure 3. Ces derniers reflètent une tendance croissante avec l'ajout de verre de rebut jusqu'à un pourcentage optimal de 30%. À ce stade, la résistance à la compression maximum développée est de 58,5 MPa, soit 6% de plus que celle obtenue par le béton témoin (55,1 MPa). L'augmentation de la résistance au-dessus de celle du béton de référence peut être attribuée à la nature angulaire de l'agrégat de verre, qui a une plus grande surface que les particules de sable naturellement arrondies. Cette surface permet une plus grande adhérence avec la pâte de ciment, ce qui entraîne une matrice de béton plus forte. La même étude a montré aussi que les échantillons contenant 40% de déchet de verre présentent une résistance à la compression de 47,2 MPa, soit 16% de moins que celle obtenue par le béton témoin. Il peut donc être conclu que les niveaux de remplacement du verre à plus de 30% affectent négativement le développement de la résistance à la compression. Des résultats semblables ont été obtenus par (Malik, *et al.*, 2013)[15], qui ont constaté que la résistance à la compression diminuait de 8% à un pourcentage de remplacement du verre de 40% lorsqu'il adoptait une distribution similaire de particules de verre à celle adoptée par (M. Adaway *et al.*, 2015)[6]. Alors que des études antérieures ont laissé entendre que cette tendance est le résultat d'une réduction de l'adhérence entre les particules de verre et la pâte de ciment (référence). Les résultats de (M. Adaway *et al.*, 2015)[6] suggèrent que la nature angulaire des particules de verre peut contribuer davantage à la réduction de la résistance. Il est suggéré que là où l'agrégat de verre est présent dans des proportions plus élevées, il n'y a pas en quantité suffisante de pâte de ciment dans le mélange pour faciliter le collage avec toutes les particules, entraînant la formation des vides microscopiques qui affectent

négativement la résistance. De plus, (Najib N. G *et al.*, 2018)[7] ont étudié l'effet de la variation de la fraction volumique (verre/agrégats fins) et (verre/agrégat gros) comme indiqué ci-après dans le tableau 01.

Tableau III-1 : Formulations des béton (Najib N. G *et al.*, 2018)[7]

| Specimen No. | Coarse Aggregates |         | Fine Aggregates |         |
|--------------|-------------------|---------|-----------------|---------|
|              | Glass             | Natural | Glass           | Natural |
| I            | 0%                | 100%    | 0%              | 100%    |
| II           | 33%               | 67%     | 0%              | 100%    |
| III          | 50%               | 50%     | 0%              | 100%    |
| IV           | 67%               | 33%     | 0%              | 100%    |
| V            | 100%              | 0%      | 0%              | 100%    |
| VI           | 0%                | 100%    | 100%            | 0%      |

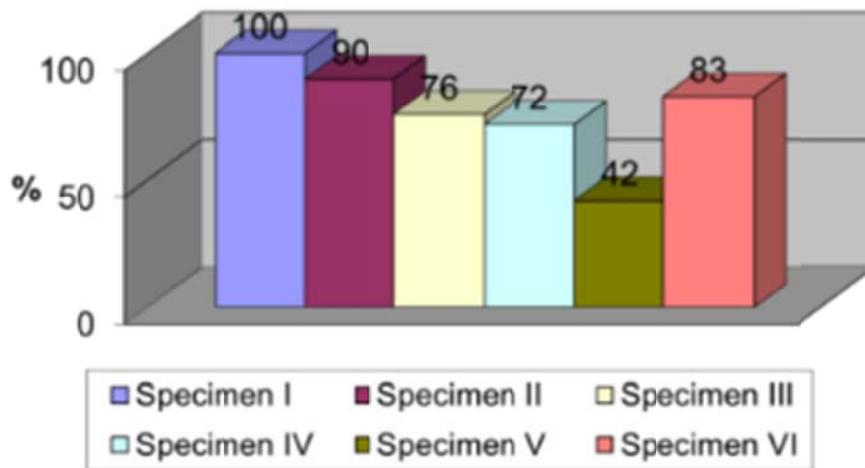


Figure III-3 : La comparaison de la résistance à la compression à 28 jours de tous les échantillons (Najib N. G *et al.*, 2018)[7]

La Figure 3 compare la résistance à la compression à l'âge de 28 jours du mélange de référence (échantillon I) et d'autres mélanges avec remplacement partiel d'agrégat de verre. À partir de ces résultats, on peut déduire que le meilleur remplacement des agrégats parmi les rapports testés se produit à un tiers des gros agrégats naturels avec des agrégats gros de verre (échantillon II). Le remplacement des agrégats fins de 100% avec le verre montre également le niveau élevé de la résistance (échantillon VI).

Par ailleurs, des chercheurs ont valorisé l'ajout de la poudre de verre en remplacement partiel du ciment (Hussain, *Set al.*, 1994[16] Ablam Zidol *et al.*, 2012[9] M. Rahman, 2015[17] ;

Ablam Zidol *et al.*, 2017[12]) ont fait un travail basé sur l'étude de l'effet de la poudre de verre sur les propriétés du béton. Les résultats ont montré un bon comportement de cette addition minérale par rapport aux ajouts minéraux au ciment (cendres volantes « classe F » & Laitier « classe S »). Comme attendu, l'augmentation du rapport E/L abaisse la résistance à la compression du béton contenant de poudre de verre à l'âge précoce comme le montre la figure 4. Cependant, le développement de la résistance à la compression semble être plus important avec l'augmentation du rapport E/L en présence de la poudre de verre à long terme. Ce comportement reflète une activité pouzzolanique lente et continue de la poudre de verre dans les mélanges avec suffisamment d'eau libre disponible. En outre, l'amélioration de la durabilité du béton en présence de la poudre de verre est plus importante avec l'augmentation de son taux d'incorporation et/ou rapport E/L. En comparant l'effet de poudre de verre avec les autres ajouts minéraux au ciment, on peut observer que les actions de la poudre de verre sur les propriétés concrètes sont semblables à celles de la classe F de cendres volantes. Le laitier (Classe S) semble développer des effets significatifs à un âge précoce par rapport aux autres additions, mais à long terme (à partir de 91 jours) leurs effets sont équivalents. Comme la poudre de verre développe des effets tout à fait semblables ou même meilleurs que d'autres ajouts minéraux étudiés sur des propriétés en béton. Elle pourrait être utilisée comme un matériau supplémentaire où les ajouts minéraux conventionnels ne sont pas disponibles.

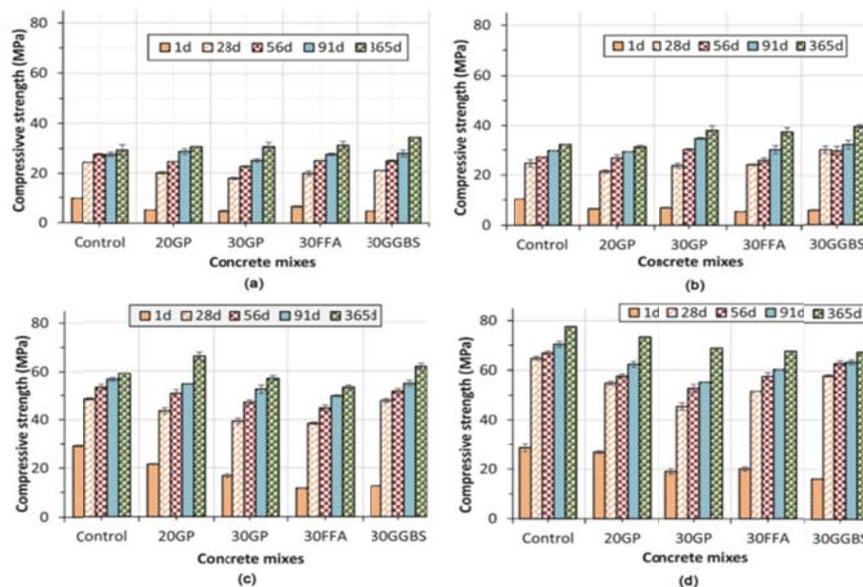


Figure III-4 : Résistance à la compression de différents mélanges selon le rapport E/L (Ablam Zidol *et al.*, 2017)[12]

Où : (a)  $E/L=0.65$  ; (b)  $E/L=0.55$  ; (c) :  $E/L=0.40$  ; (d)  $E/L=0.35$ .

« Control » : Mélange témoin sans ajouts.

20GP : remplacement partiel de 20% de ciment par la poudre de verre.

30GP : remplacement partiel de 30% de ciment par la poudre de verre.

30FFA : remplacement partiel de 30% de ciment par la cendre volante.

30GGBS : remplacement partiel de 30% de ciment par le laitier.

### III.3 Synthèse générale sur les éco-bétons

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé dans le monde avec environ 10 milliards de mètres cubes coulés par an [18]. Il est responsable de 5,2 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre, principalement en raison du processus de fabrication du ciment qui nécessite une température de cuisson très élevée pour former le clinker [19]. Pour assurer la durabilité environnementale, il est important d'envisager des moyens de réduire davantage l'impact carbone de ce matériau.

L'utilisation d'ajouts minéraux, tels que la fumée de silice, le laitier de haut fourneau et les cendres volantes, pour remplacer le ciment dans le béton est une piste prometteuse pour réduire l'impact environnemental de l'industrie [20–25]. Au-delà des aspects environnementaux, les ajouts des minéraux améliorent la maniabilité du béton ainsi que ses propriétés mécaniques et sa durabilité. Elles améliorent également ses propriétés thermiques (la conductivité thermique, la chaleur spécifique, etc. [26–28]) et les paramètres de transfert de masse tels que l'isotherme de sorption et la perméabilité à la vapeur d'eau [29]. L'utilisation d'autres ajouts, tels que, par exemple, des déchets de verre comme substitut au ciment, reste un défi pour les ingénieurs du secteur de la construction. Son incorporation dans le béton est relativement récente et a été motivée par les propriétés physiques et chimiques du verre, qui sont relativement similaires à celles des autres matériaux cimentaires [5]. Le verre peut être utilisé comme matériau cimentaire supplémentaire mais n'a pas encore obtenu le même succès commercial que les ajouts minéraux en raison du manque de données dans la littérature.

Lorsque le verre est utilisé comme agrégat, sa forte teneur en alcali génère la réaction alcali-silice (RAS), qui provoque des tensions et des fissures dommageables dans le béton [30]. En outre, plusieurs études ont été menées pour tester les applications du verre dans le béton en tant que remplacement partiel des agrégats fins [6,7]. Elles ont conclu que la résistance à la

compression à long terme augmentait jusqu'à 30 % avec l'ajout de verre. Au-delà, le verre affecte la résistance mécanique du béton. Cette influence s'explique par la nature angulaire du verre dans l'interface agrégat/pâte (ITZ) [32]. Il augmente le risque de RAS dans le béton et la formation de vides microscopique [30]. Cela a un effet délétère sur la matrice cimentaire [8]. Pour surmonter cet inconvénient, le verre est broyé en fine poudre et utilisé comme remplacement partiel du ciment. Il développe donc une réaction pouzzolanique qui a un effet positif sur les principales propriétés du béton et contribue également à réduire l'expansion du béton due aux RAS [12]. En fait, [30] a souligné que l'utilisation de moins de 30% de poudre de verre en remplacement du ciment dans le béton, en particulier les particules de poudre de verre inférieures à 75 microns, réduit les RSA. D'autres chercheurs [10,31–34] se sont penchés sur l'effet de la taille des particules de verre sur les RSA, ils ont indiqué que plus les particules de poudre de verre sont fines, plus l'expansion est faible. En outre, il a été démontré que la poudre de verre obtenue à partir de bouteilles de verre de broyage développe des propriétés pouzzolaniques et peut être utilisée comme substitut du ciment dans la construction [10,30,32,35].

Le remplacement partiel du ciment par la poudre de verre améliore les propriétés du béton frais, de sorte qu'il peut être utilisé pour fabriquer du béton à haute résistance sans utiliser d'autres superplastifiants [14]. Par conséquent, la poudre de verre pourrait être utilisée correctement comme un autre matériau lorsque les ajouts minéraux conventionnels ne sont pas disponibles. En outre, l'incorporation de poudre de verre et d'ajouts minéraux dans le béton a été étudiée. Des études expérimentales ont montré un bon comportement du béton avec de la poudre de verre en ce qui concerne la résistance mécanique et la perméabilité, par rapport au béton avec uniquement des ajouts de minéraux (cendres volantes et laitier) [9,12,16,17].

#### **III.4 Définitions et caractérisation de la structure poreuse des bétons**

Le béton est un matériau polyphasique. Il est composé d'une phase solide, d'une phase liquide et d'une phase gazeuse (cf. Figure 5). Le solide (la matrice) est constitué des granulats, des hydrates et des parties du liant non hydratées. La phase liquide est la solution interstitielle et la phase gazeuse est un mélange d'air et de vapeur d'eau [36].

Schématiquement, le béton, matériau poreux, peut être représenté selon la figure suivante :

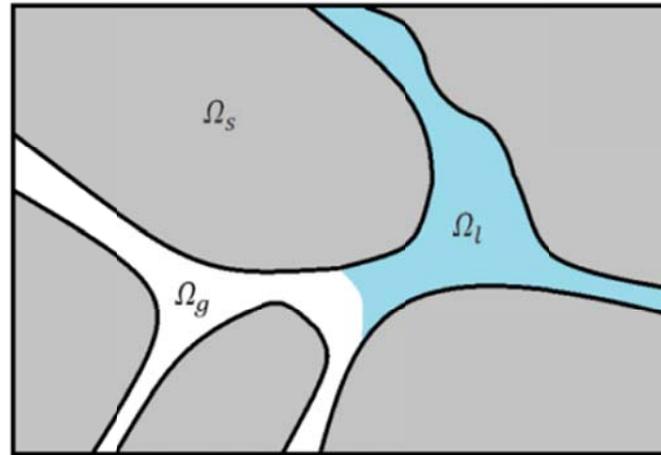


Figure III-5 : Représentation d'un milieu poreux (Bennai et al., 2016)[37].

$\Omega_s$  : La phase solide ou la matrice du matériau qui comporte un réseau poreux (des vides capillaires).

$\Omega_l$  : La phase liquide constituée d'eau contenue dans l'espace poral.

$\Omega_g$  : La phase gazeuse contenue aussi dans l'espace poral. Elle est constituée de vapeur d'eau et l'air sec.

### III.4.1 Les propriétés thermiques du béton

Le transfert de chaleur dans les milieux poreux humide se produit par plusieurs manières à cause de trois phases existantes en même temps :

- Conduction : dans les phases liquide, solide et gazeuse
- Convection : dans les pores
- Rayonnement : entre les parois des pores
- Changement de phase : évaporation ou condensation de la vapeur dans les pores.
- Diffusion de vapeur d'eau liée à un gradient de température et de la teneur en eau.

En pratique, les transferts de masse et de chaleur ont lieu simultanément d'où l'importance d'étudier les transferts hygrothermiques couplés dans les milieux poreux. On suppose qu'il n'y a pas de source d'énergie générée dans le milieu poreux, la conductivité thermique est constante et si le terme de convection dans les pores est négligé, l'équation de transfert de chaleur peut être exprimée sous la forme :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda_m}{(\rho c)_m} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

En le régime stationnaire l'accumulation de la chaleur :  $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$

Donc l'équation de transfert de chaleur vaut :  $a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0$

Où le rapport entre la conductivité thermique globale et la capacité thermique volumique  $(\rho c)_m$  est nommée la diffusivité thermique dont l'unité est exprimée par  $m^2/s$ . La diffusivité thermique est une grandeur intensive qui caractérise la vitesse de pénétration de chaleur dans un matériau. Plus elle est faible, plus le front de chaleur met du temps à traverser l'épaisseur du matériau.

#### **III.4.1.1 Conductivité thermique**

La conductivité thermique  $\lambda$  ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ ) est l'aptitude d'un matériau à transférer la chaleur. Elle exprime l'énergie nécessaire pour transférer un gradient de température de 1K pour un matériau de 1m d'épaisseur. Plus le matériau est isolant, plus le coefficient  $\lambda$  est faible. Elle a un caractère intrinsèque du matériau et sa valeur ne dépend pas de la surface de la paroi.

Issaadi. N, 2015 [38] a mesuré la conductivité thermique pour des pâtes de ciment et de mortiers avec et sans laitier (cf. Tableau 2), on remarque que la conductivité thermique évolue en fonction de la température, le tableau présente les résultats de l'essai des différents matériaux testés après une conservation de 28 jours dans une salle humide dont la température est de  $20 \pm 2$  °C et l'humidité relative de  $95 \pm 3\%$ . Les essais ont été menés à 28 jours d'âge.

Tableau III-2 : Résultats des essais de conductivité thermique sur des matériaux à un âge  $\geq 28$  jours [38].

|            | Température (°C)                | 10     | 20     | 30      |
|------------|---------------------------------|--------|--------|---------|
| Pâte1      | Pâte1-1                         | 354,80 | 372,00 | 390,00  |
|            | Pâte1-2                         | 354,50 | 371,90 | 388,00  |
|            | Pâte1-3                         | 354,80 | 370,40 | 386,70  |
|            | Écart-type<br>( <i>mW/m.K</i> ) | 0,17   | 0,89   | 1,66    |
| PâteL30    | Pâte L30-1                      | 307,85 | 322,17 | 338,90  |
|            | Pâte L30-2                      | 312,75 | 325,90 | 342,30  |
| Mortier1   | Mortier1-1                      | 542,90 | 567,20 | 594,30  |
|            | Mortier1-2                      | 565,10 | 594,30 | 618,40  |
|            | Mortier1-3                      | 582,50 | 597,50 | 622,60  |
|            | Écart-type<br>( <i>mW/m.K</i> ) | 19,84  | 16,69  | 15,44   |
| MortierL30 | Mortier L30-1                   | 871,90 | 937,00 | 1001,20 |
|            | Mortier L30-2                   | 918,30 | 981,30 | 1027,00 |
|            | Mortier L30-3                   | 952,10 | 989,10 | 1017,00 |
|            | Écart-type<br>( <i>mW/m.K</i> ) | 40,26  | 28,10  | 13,33   |

La conductivité thermique est fortement dépendante de l'état hydrique des matériaux. La Figure 6 présente une évolution de la conductivité thermique du mortier L30 en fonction de sa teneur en eau massique lors d'un essai conduit à 10 °C. Nous distinguons de ce résultat une évolution quasi linéaire dont la droite de régression est :  $\lambda=36,803 U+825,56$  ; avec  $U$  [%] désignant la teneur en eau massique de l'échantillon. Ce résultat confirme la forte dépendance de la conductivité thermique, de l'état hydrique du matériau et l'importance de la prise en compte de cette dépendance dans les simulations numériques.

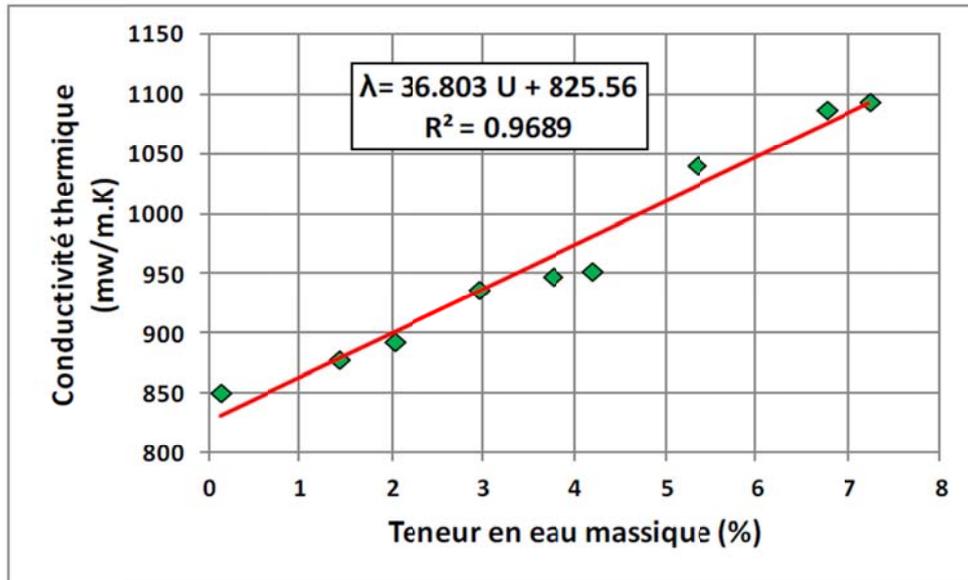


Figure III-6 : Évolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau du mortier L30 à 3 mois d'âge [38]

La conductivité thermique est aussi mesurée par un dispositif expérimental de la plaque chaude gardée. Le tableau 03 donne les valeurs de conductivité thermique en fonction de la température (Rahim. M, 2015)[39]. Par comparaison aux essais de conductivité thermique d'autres chercheurs (Laidoudi, B, 2012) [40], L'anas de lin est un bon isolant.

Tableau III-3 : Conductivités thermiques en fonction de la température de lin (Thèse Rahim. M, 2015)[39]

|         | $\rho_0$<br>[kg.m-3] | $\lambda$ [W.m-1.K-1] |       |       |       | $\lambda(T)$  | $R^2$ |
|---------|----------------------|-----------------------|-------|-------|-------|---------------|-------|
|         |                      | T[°C]                 |       |       |       |               |       |
|         |                      | 10                    | 20    | 30    | 40    |               |       |
| Lin     | 90                   | 0.041                 | 0.042 | 0.044 | 0.046 | 0.0002T+0.039 | 0.994 |
| Chanvre | 125                  | 0.049                 | 0.050 | 0.052 | 0.053 | 0.0002T+0.047 | 0.998 |

Concernant les bétons biosourcés, les conductivités thermiques en fonction de la température et de la teneur en eau, du béton de lin sont présentées dans la Figure 19.

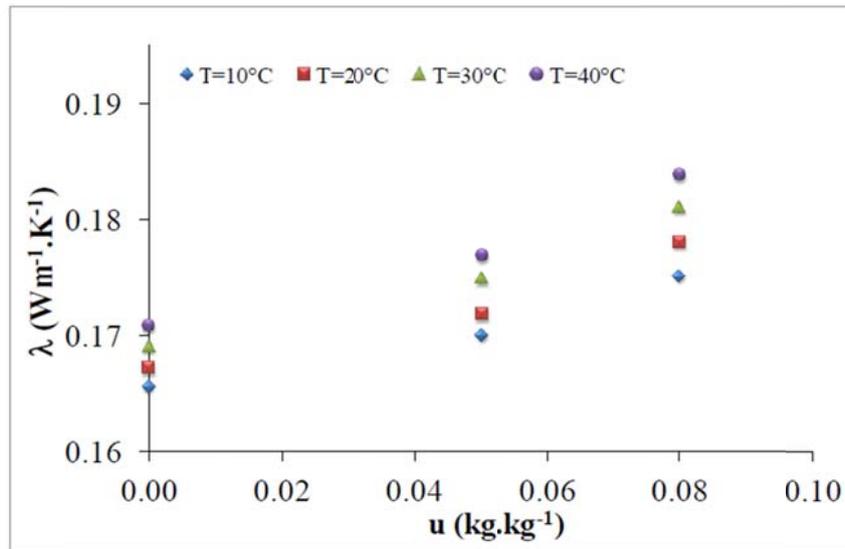


Figure III-7 : Conductivité thermique du béton de lin en fonction de la température et de la teneur en eau [39]

D'après ces résultats, la conductivité thermique est une fonction croissante et assimilable à une évolution quasi-linéaire de la teneur en eau. En effet, en comparant les mesures à l'état sec et celle de à 0,08 kg.kg<sup>-1</sup> de teneur en eau, la conductivité thermique mesurée à la température moyenne de 10°C augmente d'environ 6 %, tandis qu'à la température moyenne de 40°C augmente d'environ 8%. En outre, les résultats montrent que l'effet de la température sur la conductivité thermique est relativement plus élevé à haute teneur en eau (0,08 kg.kg<sup>-1</sup>). Par comparaison entre les mesures effectuées à 10 et 40°C, à l'état sec, l'augmentation de la conductivité thermique n'est pas supérieure à 5% pour l'ensemble des bétons, par contre, à la teneur en eau des échantillons de 0,08 kg.kg<sup>-1</sup>, l'augmentation est d'environ 10%.

Ces résultats montrent que l'influence de la teneur en eau et de la température sur la conductivité thermique doit être prise en compte pour la simulation du comportement hygrothermique

### III.4.2 La chaleur spécifique

La capacité thermique  $C_s$ (J. K<sup>-1</sup>.kg<sup>-1</sup>) exprime la capacité du matériau à stocker de la chaleur. Elle est caractérisée par la chaleur massique ou la chaleur volumique qui mesure la quantité d'énergie nécessaire pour élever de 1 K, 1 kg (ou 1 m<sup>3</sup>) du matériau.

Ferroukhi [41] a suivi l'évolution de la chaleur spécifique en fonction de la teneur en eau du matériau, est représenté dans la Figure 8 pour la brique et le plâtre.

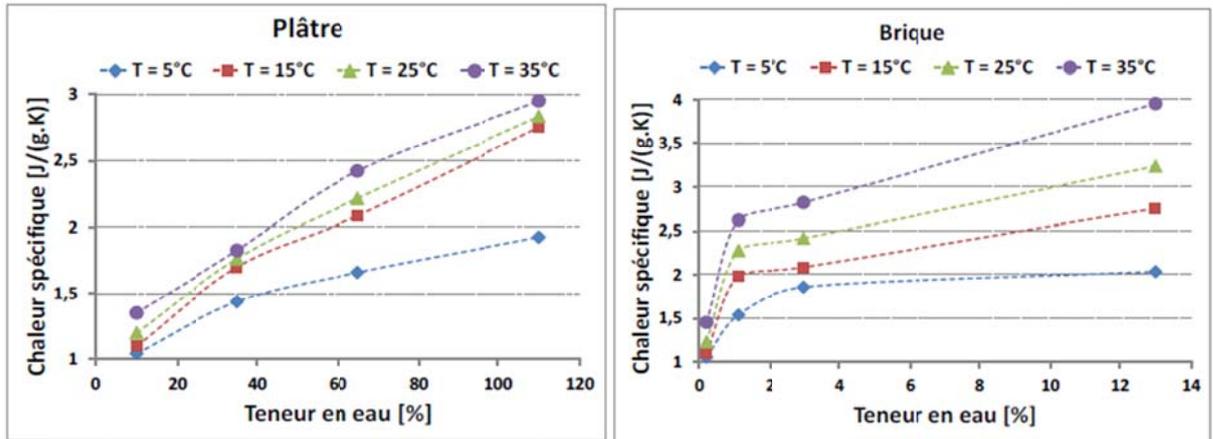


Figure III-8 : Evolution de la chaleur spécifique en fonction de l'état hydrique du matériau [41]

Les résultats illustrés sur la Figure 8 montrent que la chaleur spécifique augmente avec la hausse de la température. Cette augmentation est caractérisée par une pente qui dépend de la nature du matériau. En effet, entre 15°C et 35 °C, la chaleur spécifique augmente de 10% pour le plâtre ( $C_p(15^\circ\text{C}) = 1.044 \text{ [J/(g} \cdot \text{K)]}$  et  $C_p(35^\circ\text{C}) = 1.150 \text{ [J/(g} \cdot \text{K)]}$ ). Pour la brique, la hausse de la chaleur spécifique est de 5%, elle est moins importante que celle du plâtre ( $C_p(15^\circ\text{C}) = 0.747 \text{ [J/(g} \cdot \text{K)]}$  et  $C_p(35^\circ\text{C}) = 0.782 \text{ [J/(g} \cdot \text{K)]}$ ). Concernant la variation de la chaleur spécifique en fonction de l'état hydrique du matériau, les résultats montrent que la teneur en eau a un effet significatif sur la valeur de la chaleur spécifique. Pour le plâtre, une hausse moyenne de 146% est observée entre un état relativement sec ( $\omega = 10\%$ ) et l'état saturé. Le même constat est noté pour la brique avec une hausse moins importante de l'ordre de 51% entre l'état sec et l'état saturé (à 20°C : ( $\omega = 0.2\%$ ) =  $0.766 \text{ [J/(g} \cdot \text{K)]}$  et  $C_p(\omega = 13\%) = 1.158 \text{ [J/(g} \cdot \text{K)]}$ ). En effet, la chaleur spécifique d'air est de  $1.042 \text{ [J/(g} \cdot \text{K)]}$  alors de celle de l'eau est de  $4.185 \text{ [J/(g} \cdot \text{K)]}$ , donc quand la teneur en eau augmente dans le matériau, la proportion d'air diminue et par conséquent la chaleur spécifique du matériau augmente.

### III.4.3 L'inertie thermique

L'inertie thermique est la capacité d'un corps à stocker de la chaleur. Elle est caractérisée par la capacité thermique. L'intérêt de l'inertie thermique d'une paroi opaque est de restituer la chaleur ou la fraîcheur stockée en décalage avec les variations thermiques en dehors et dans le bâtiment. La vitesse de stockage ou déstockage de la chaleur est déterminée par deux autres grandeurs que sont la diffusivité et l'effusivité.

#### III.4.4 La diffusivité thermique [D]

C'est la vitesse à laquelle la chaleur se propage par conduction dans un corps. Elle fait intervenir la conductivité thermique  $\lambda$  et la capacité thermique  $C_s$  d'un matériau et s'exprime en  $[m^2 \cdot s^{-1}]$ . Plus la valeur de diffusivité thermique est faible, plus la cinétique de transfert de chaleur sera lente. C'est une grandeur qui traduit l'inertie thermique

$$D = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (m^2 / s)$$

#### III.4.5 L'effusivité thermique [b]

Elle indique la capacité des matériaux à absorber (ou restituer) plus ou moins rapidement un apport de chaleur. L'effusivité caractérise la sensation de « chaud » ou de « froid » que donne un matériau. Si la valeur d'effusivité est élevée, le matériau absorbe rapidement beaucoup d'énergie sans se réchauffer notablement en surface (métal, pierre, faïence...). A l'inverse une valeur d'effusivité faible indique que le matériau se réchauffe rapidement en surface en absorbant peu de chaleur (isolant, bois...). La valeur  $b$  exprime la quantité d'énergie ayant pénétré sur  $1 m^2$  de surface de matériau, 1 seconde après qu'elle ait été mise en contact avec une autre surface de  $1 m^2$  plus chaude qu'elle de  $1 K$   $[J \cdot m^{-2} \cdot S^{-1} \cdot K^{-1}]$ . Tout comme la diffusivité, elle utilise la capacité thermique et la conductivité thermique du matériau pour son calcul.

$$b = \sqrt{\lambda \rho c} \quad (J \cdot K^{-1} \cdot m^{-2} \cdot s^{-1/2})$$

### III.5 Les propriétés physiques et hydriques du béton

Ayant une forte porosité, le béton a la particularité de pouvoir stocker et déstocker la vapeur au sein de ses cavités et pores. Par conséquent, il contribue à stabiliser l'humidité relative intérieure du local. De plus, l'eau existant dans le matériau a une influence importante sur les propriétés physiques. Ainsi, cette partie porte sur la caractérisation hydrique du béton afin de mieux comprendre le mécanisme de transfert de masse dans ce matériau.

Dans cette section on s'intéresse à des aspects physiques. Ainsi, des grandeurs peuvent être extraites pour le caractériser.



Figure III-9 : Les trois phases d'un milieu non saturé

- $V$  : Le volume apparent ( $m^3$ )       $m$  : La masse totale (kg)  
 $V_s$  : Le volume solide ( $m^3$ )       $m_s$  : La masse de solide (kg)  
 $V_l$  : Le volume liquide ( $m^3$ )       $m_l$  : La masse de liquide (kg)  
 $V_g$  : Le volume gazeux ( $m^3$ )       $m_g$  : La masse de gaz ( $m^3$ )  
 $V_p$  : Le volume des pores ( $m^3$ )

La masse totale :  $m = m_l + m_s + m_g$  (kg)

Le volume apparent :  $V = V_l + V_s + V_g$  ( $m^3$ )

Le volume des pores :  $V_p = V_l + V_g$  ( $m^3$ )

La masse volumique et la masse volumique sec :  $\rho = \frac{m}{V}$ ;  $\rho_0 = \frac{m_{\text{sec}}}{V}$

### III.5.1 Teneur en eau

La teneur en eau permet de quantifier la quantité d'eau dans un milieu donné. En pratique, on définit une teneur en eau massique ou volumique.

La teneur en eau massique  $u$  (%) représente le rapport entre la masse d'eau liquide  $m_l$  et la masse de la matrice solide  $m_s$ . Elle est donnée par l'équation :

$$u = \frac{m_l}{m_s} = \frac{m - m_s}{m_s} \quad (\%); w = \frac{m - m_s}{V} = \rho_0 u \quad (\text{kg} / \text{m}^3)$$

La teneur en eau volumique  $\theta$ (%) est définie par le rapport entre le volume d'eau liquide

$V_l$  et le volume total  $V$  par la relation :

$$\theta = \frac{V_l}{V} \quad (\%)$$

### III.5.2 Porosité, porosité accessible à l'eau, porosité par intrusion de mercure

La porosité totale qui tient compte des cavités occluses au sein du solide (pore fermé) :

$$n = \frac{V_g + V_l}{V} = \frac{V + V_s}{V} = \frac{\rho_s - \rho_0}{\rho_s} \quad (\%)$$

La détermination de la porosité accessible à l'eau se réalise selon la procédure de l'AFPC-AFREM (1997), Au cours de l'essai, l'échantillon passe par quatre phases distinctes :

La phase 1 est le dégazage de l'échantillon au moyen du banc de saturation présenté dans la Figure 10. La mise sous vide est réalisée au moyen d'une pompe à vide capable de maintenir un vide absolu à l'intérieur du dessiccateur (pression proche de 2mm Hg) pendant 4 heures. Puis le récipient est rempli d'eau afin de saturer les échantillons tout en poursuivant le pompage pendant 24h pour maintenir l'enceinte à la pression de vapeur d'eau saturante, ensuite l'ensemble est mis à pression atmosphérique pendant 24 heures.

La phase 2 consiste à peser une première fois dans l'eau à l'aide d'une balance hydrostatique, la masse de l'échantillon immergé  $M_{eau}$  est alors obtenue.

La phase 3 est de peser à l'air l'échantillon extrait de l'eau et légèrement essuyé pour obtenir la masse de l'échantillon saturé notée  $M_{air}$ .

La phase 4 est la phase de séchage, l'échantillon est mis dans une étuve à une température de 105 °C jusqu'à ce que l'échantillon soit sec et que le critère d'équilibre suivant soit vérifié :

$$\frac{\Delta m}{m} \leq 0.1\%$$

Où  $\Delta m_{24h}$  est la perte de masse entre deux pesées effectuées à 24 heures d'intervalle, et  $m$  sa masse à la première borne de l'intervalle. Après équilibre, la masse de l'échantillon sec  $M_{sec}$  est alors obtenue.

La porosité accessible à l'eau est calculée comme suit :

$$\varepsilon = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}}$$

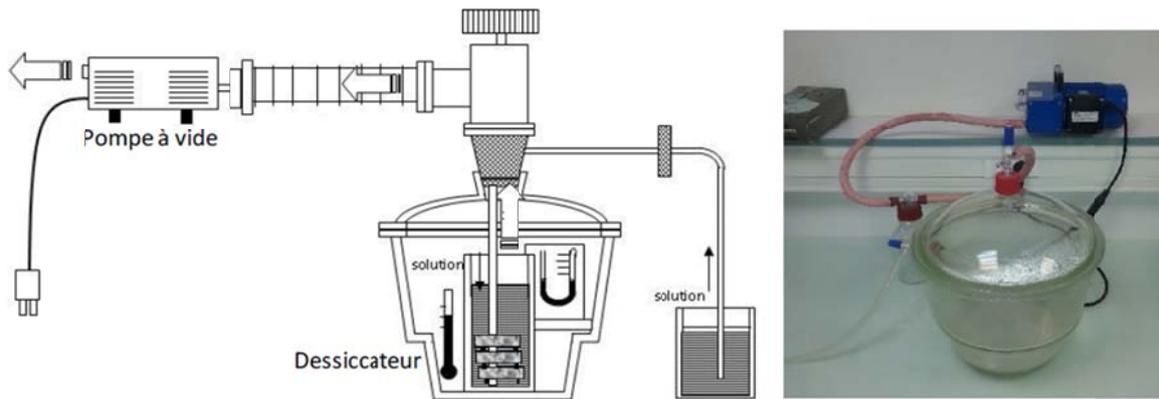


Figure III-10 : Banc de saturation

La porosimétrie par injection de mercure suivant la norme ASTM D4404-84 (1998)[42] est l'une des techniques les plus utilisées pour déterminer la structure poreuse et ainsi que la caractérisation de microstructure des matériaux poreux. Cette technique délivre aussi des informations concernant la distribution du volume et de la taille des pores. Les mesures ont été réalisées à l'aide d'un porosimètre à mercure Micrometrics®-Autopore V 9600 (cf. Figure 11) pouvant atteindre une pression de 414 MPa. Ce dispositif permet de couvrir une gamme de pores allant de  $0.003 \mu\text{m}$  à  $360 \mu\text{m}$  de diamètre, et compte tenu de la difficulté d'un séchage préalable complet de l'échantillon sans en modifier la microstructure, cette technique tend à sous-estimer la porosité.



Figure III-11 : Porosimètre à mercure Micrometrics®-Autopore V 9600

L'essai consiste à sécher préalablement les échantillons cubiques d'environ 15 mm obtenus par sciage dans une étuve à 45°C jusqu'à stabilisation de leurs masses. Il s'agit ensuite, d'introduire progressivement du mercure (liquide non mouillant) sous pression dans la structure poreuse initialement vide. Puis le mercure est injecté dans les échantillons par paliers de pression jusqu'à l'équilibre. Ainsi, chaque palier de pression correspond à un volume injecté. A partir de ce couple de mesures, nous pouvons remonter à toute sorte d'informations notamment le rayon des pores correspondant à chaque palier de pression et donc à la distribution de la taille des pores (supposés cylindriques) qui est basée sur l'équation de Washburn comme suit :

$$r_p = -\frac{2\sigma_{Hg} \cos \theta}{P_{Hg}}$$

Où  $r_p[m]$  est le diamètre du pore ;

$P_{Hg} [Pa]$  la pression exercée sur le mercure ;

$\sigma_{Hg}[N/m]$  la tension superficielle de mercure ( $\sigma_{Hg} = 0.480 N.m^{-1}$  est la valeur couramment utilisée),

$\theta$  l'angle de contact entre la surface solide et le mercure ( $\theta = 130^\circ$  souvent recommandé pour des températures entre 20 à 25°C).

L'objectif principal de cette méthode est la détermination de distribution des pores et cela à partir d'une courbe caractéristique de l'essai  $dV/d\log D = f(r_p)$ . Cette dernière traduit le volume de mercure injecté pour chaque rayon capillaire.

Ferroukhi [41] a réalisé des essais de porosité par intrusion de mercure ont été réalisés sur les quatre matériaux de construction (bois aggloméré, brique, parpaing et plâtre). La distribution cumulée des diamètres des pores sont représentées sur la Figure 12. Les courbes de la distribution de la taille des pores montrent que pour les matériaux relativement homogènes comme la brique et le plâtre, la distribution porale est monomodale. Pour le plâtre, la taille des pores est comprise entre 0.7  $\mu m$  et 3  $\mu m$  avec un diamètre critique de 0.95  $\mu m$ . Pour la brique, la plage de taille des pores est plus large que celle du plâtre, elle est entre 0.3  $\mu m$  et 6.8  $\mu m$  avec un diamètre critique est de 0.90  $\mu m$ . Concernant le bois aggloméré et le parpaing, qui représentent des matériaux hétérogènes composites, la distribution porale est bimodale. Dans ce genre de matériaux, deux types de porosités peuvent se manifester. La première correspond aux espaces entre particules et la deuxième est la porosité entre les grains composant le matériau. Bien que la détermination de la porosité par intrusion de mercure est largement utilisée, l'application de cette technique à de nombreuses limitations notamment la sous-estimation du volume des classes de pores les plus fines (effet bouteille d'ancre) [43](Daïan,

1986). Cependant, malgré ses imperfections, cette méthode reste l'une des seules à pouvoir analyser des diamètres de pores de quelques nanomètres à quelques centaines de micromètres. De plus, cette technique d'intrusion permet d'apporter des informations sur la connectivité du réseau poreux, donc sur les phénomènes de transport notamment le transfert hydrique.

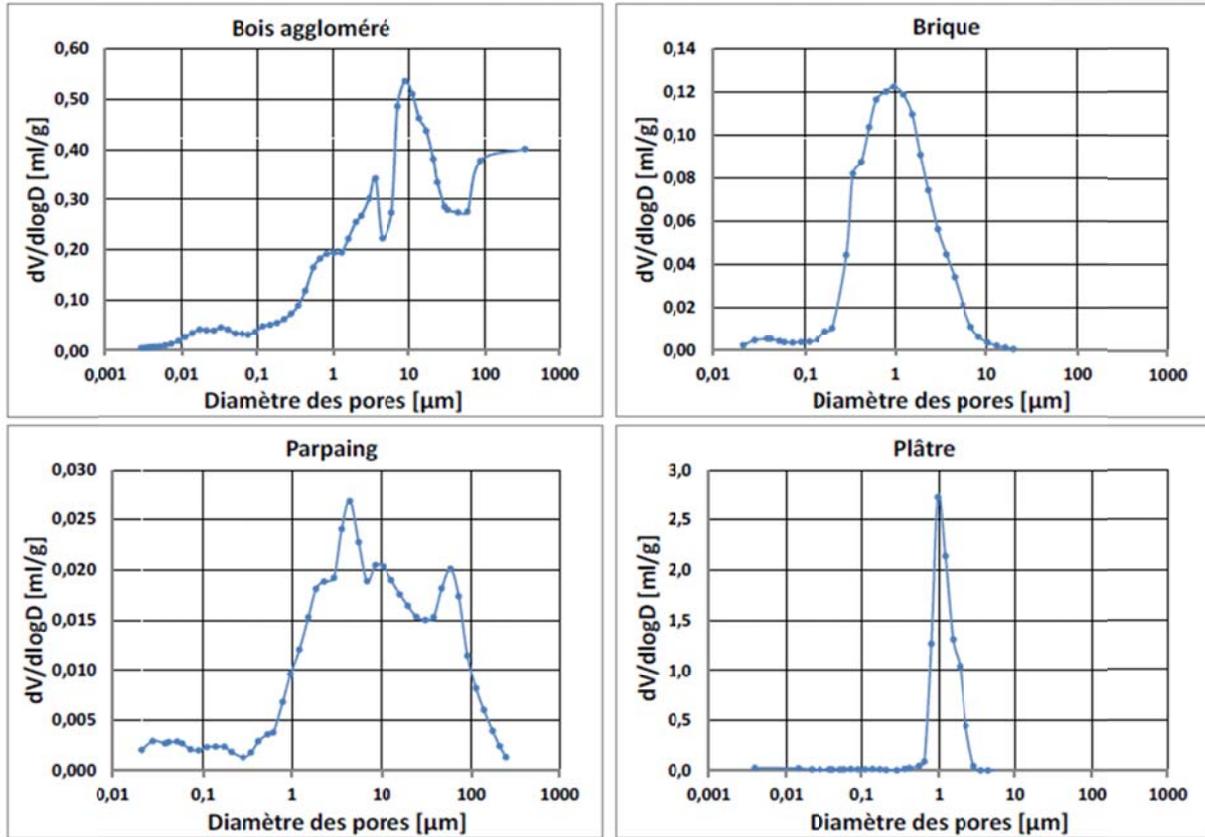


Figure III-12 : Distribution de la taille des pores obtenue par intrusion au mercure pour le bois aggloméré, la brique, le parpaing et le plâtre [41]

### III.5.3 Humidité relative

L'humidité relative (ou hygrométrie) représente pour une température donnée le rapport entre l'humidité absolue de l'air étudié et l'humidité maximale qu'il pourrait atteindre s'il était saturé de vapeur (humidité absolue de saturation).

$$Hr = \frac{P_v}{P_{v, sat}} \cdot 100 \quad (\%)$$

L'humidité relative est notée Hr et s'exprime sous forme de pourcentage. Une hygrométrie de 100 [%] correspond à la saturation. Les valeurs d'hygrométrie inférieures à 100 [%] correspondent aux courbes tracées à l'intérieur du diagramme ci-dessous (cf. Figure 13).

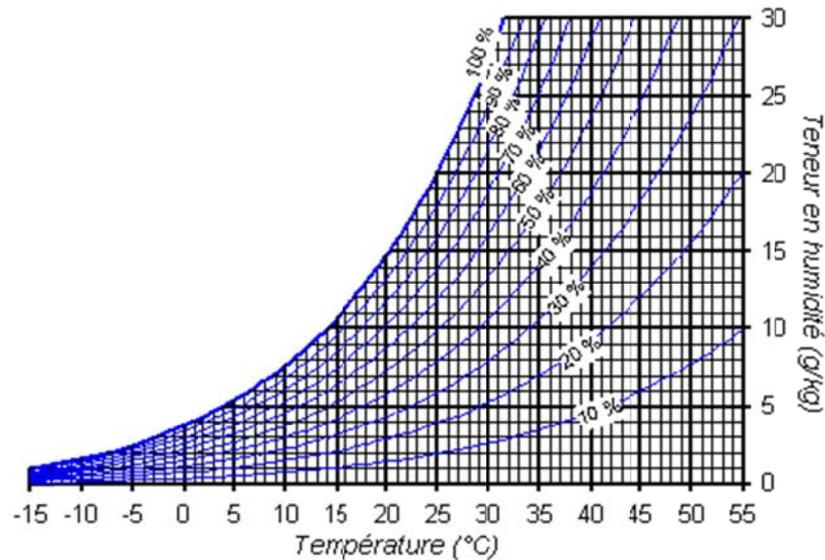


Figure III-13 : Diagramme de l'hygrométrie en fonction de la température de l'air et la teneur en humidité.

### III.5.4 Surface spécifique

La surface spécifique massique ou volumique (exprimée en  $m^2/g$  ou  $m^{-1}$ ) est l'aire de l'interface pore/matrice contenue dans un volume ou dans une masse du matériau (cf. Figure 14). Cette propriété est donc liée à la structure poreuse du milieu. Une valeur élevée de la surface spécifique conduit à une capacité d'adsorption particulièrement importante du matériau. C'est une donnée essentielle pour la caractérisation des matériaux poreux de construction.

La surface spécifique peut être mesurée en se basant sur la théorie BET [44](Brunauer ; Emmett et Teller, 1938), cette dernière est basée sur le recouvrement de la surface solide du matériau par une couche de molécules adsorbées (J. Charpin,1982).

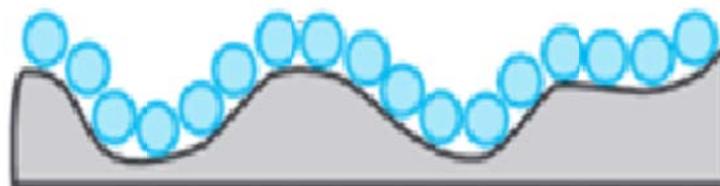


Figure III-14 : Couche de molécule adsorbées [45]

La surface spécifique est mesurée par l'exploitation des isothermes d'adsorption et de désorption de l'azote ( $N_2$ ) à 77K, déterminée expérimentalement par la norme EN ISO

9277. en utilisant le dispositif volumétrique Triflex de Micromeritics présenté sur la Figure 15, qui utilise les techniques d'adsorption de gaz. C'est est un appareil équipé d'un poste de mesure, et de deux postes de dégazage totalement indépendants. Cette courbe représente le volume du gaz adsorbé en fonction de la pression relative  $P/P_0$ . La mesure de la surface spécifique s'appuie sur la théorie de BET. L'adsorption physique de l'azote ( $N_2$ ) est donnée par l'équation de Brunauer, Emmett et Teller ci-dessous :

$$n_a = \frac{n_m C \frac{P}{P_0}}{\left(1 - \frac{P}{P_0}\right) \left(1 - \frac{P}{P_0} + C \frac{P}{P_0}\right)}$$

Où :  $n_a$  [mol/g] est la quantité adsorbée par un gramme de solide ;

$n_m$  [mol/g] : est la quantité adsorbée à la monocouche pour un gramme d'adsorbant ;

$P$  [Pa] : est la pression d'équilibre ;

$P_0$  [Pa] : est la pression de vapeur saturante ;

$C$  : est la constante BET caractéristique de l'énergie d'adsorption telle que :

$$C = \exp\left(\frac{E_a - E_l}{RT}\right)$$

$E_a$  : représente l'énergie d'adsorption en première couche, et  $E_l$  : l'énergie de liquéfaction de l'adsorbable.

L'équation dite transformée BET s'écrit sous sa forme linéaire dans le domaine de formation de la monocouche ( $0.05 < P/P_0 < 0.35$ ) comme suit :

$$\frac{\frac{P}{P_0}}{n_a \left(1 - \frac{P}{P_0}\right)} = \frac{1}{n_m C} + \frac{C-1}{n_m C} \frac{P}{P_0}$$



Figure III-15 : Micromeritics Triflex Micromeritics®-LaSIE-

Cette équation permet de relier la quantité d'azote adsorbée par gramme de solide à la pression d'équilibre relative.

En traçant la fonction  $(P/P_0)/n_a(1-(P/P_0))$  en fonction de  $(P/P_0)$ , on obtient une droite pour des pressions relatives comprises entre 0.05 et 0.35. L'exploitation de la pente de cette droite permet de déterminer les constantes  $C$  et  $nm$ . Ainsi on peut calculer la surface spécifique BET :

$$S_{BET} = \frac{A}{m_s} = \left( \frac{n_m}{m_s} \right) \sigma N_a$$

Avec :

$N_a[\text{mol}^{-1}]$  : est le nombre d'Avogadro ( $N_a=6.022.10^{23} \text{ mol}^{-1}$ ) ;

$n_m [\text{mol/g}]$  : est le volume de la monocouche ;

$\sigma [\text{nm}^2]$  : est l'aire occupée par une molécule d'adsorbat, dans le cas du l'azote adsorbé à 77K, la valeur de  $\sigma$  recommandée par l'IUPAC [46] est de  $0.162 \text{ nm}^2$ .

Pour l'azote :

$$S_{BET} = 9,76.10^4 \left( \frac{n_m}{m_s} \right)$$

Le rayon de particule dans l'hypothèse de particules sphériques peut être aussi calculé en utilisant l'expression suivante :

$$r_{BET} = \frac{3}{S_{BET} \rho}$$

Avec :  $\rho$  [ $Kg/m^3$ ] : représente la masse volumique réelle du matériau étudié.

### **III.5.5 Isothermes de sorption (adsorption/désorption)**

L'isotherme de sorption permet d'établir la capacité du matériau à capter ou à relarguer l'eau en fonction de l'humidité relative du milieu extérieur avec une température constante. La détermination expérimentale de cette courbe est indispensable pour la prédiction du comportement hydrique des matériaux poreux de construction.

Dans l'air humide, les surfaces solides sont couvertes de molécules d'eau : c'est le phénomène d'adsorption.

Dans tout milieu gazeux, les solides fixent temporairement des molécules gazeuses selon deux types d'interactions :

- par des liaisons chimiques, c'est l'adsorption chimique ;
- par des liaisons intermoléculaires de Van der Waals, c'est l'adsorption physique.

La quantité de l'eau absorbée par unité de masse est fonction de la pression, de la température et la nature du solide. De plus la teneur en humidité du matériau permet d'évaluer l'aptitude du matériau à stocker de l'eau. Cette capacité de stockage est représentée par les isothermes de sorption. Réciproquement, une baisse de l'humidité relative de l'air environnant entraîne une perte de masse apparente, due au phénomène de désorption.

Ces deux phénomènes d'adsorption et de désorption d'eau sont représentés par les courbes associées qui traduisent l'évolution de la teneur en eau d'un matériau en fonction de la valeur de l'humidité relative de l'air en équilibre à une température constante (cf. Figure 16).

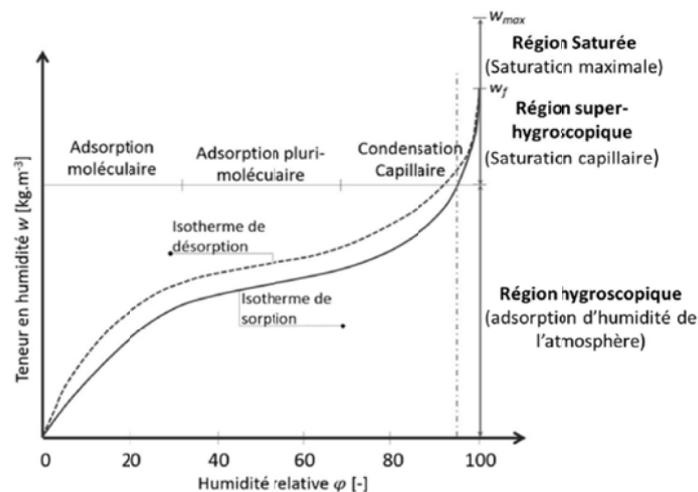


Figure III-16 : Diagramme schématique d'une courbe d'isotherme d'adsorption et désorption

[47]

Les isothermes de sorption des matériaux poreux de construction peuvent être divisées en trois régions distinctes qui traduisent le comportement du matériau à l'échelle microscopique :

- **Région hygroscopique (ou de sorption) :** Elle s'étend du matériau sec jusqu'à une valeur de l'humidité relative d'environ 95 %, et prend en compte toutes les teneurs en eau résultant de la sorption d'humidité et de la condensation capillaire jusqu'à l'établissement d'un état d'équilibre. Cette région est caractérisée par les forces de Van der Waals, lesquelles amènent les molécules d'eau à constituer une monocouche en état rigide jusqu'à couvrir la surface des pores.
- **Région super-hygroscopique :** Elle suit la région de sorption et s'étend jusqu'à la saturation libre de l'eau. Dans cette région l'eau occupe la majorité de l'espace poral, laissant des poches dans lesquelles la vapeur circule.
- **Région saturée :** si le matériau reste en contact continu avec l'eau liquide, ou la pression sur ses faces est artificiellement augmentée (cette région n'est pas atteinte dans des conditions normales de succion.), les petites poches d'air résiduelles sont dissoutes, jusqu'à atteindre la saturation maximale. Le transfert d'air n'est plus possible à travers ce matériau.

Six formes caractéristiques ont été définies par (Brunauer,1940)[48]. Cette classification a ensuite été affinée par le groupe de travail sur l'adsorption de l'IUPAC[46]. On constate que dans certains cas les isothermes d'adsorption sont différentes des isothermes de désorption, le

phénomène d'adsorption n'est donc pas toujours parfaitement réversible. Ces isothermes correspondent aux adsorbants suivants :

- Type Ia et Ib: observés pour des adsorbants microporeux, c'est-à-dire des matériaux pour lesquels la porosité est principalement constituée de pores de moins de 2 nanomètres;
- Type IIa et IIb: correspond à des agrégats de grains non poreux, par exemple des argiles, des ciments, des pigments;
- Type III: adsorption de très faible énergie sur un échantillon non poreux, c'est un cas rarement observé;
- Type IV: ces isothermes correspondent à des matériaux mésoporeux, c'est-à-dire des solides pour lesquels le volume poreux est principalement constitué de pores ayant une taille comprise entre 2 et 50 nm;
- Type V: est similaire au type IV, mais indique une faible énergie d'interaction entre l'adsorbat et l'adsorbant;
- Type VI: est un isotherme en « marches », il indique la formation successive de couches adsorbées sur la surface de l'adsorbant Ce dernier est très rare et est observé uniquement sur des surfaces très homogènes.

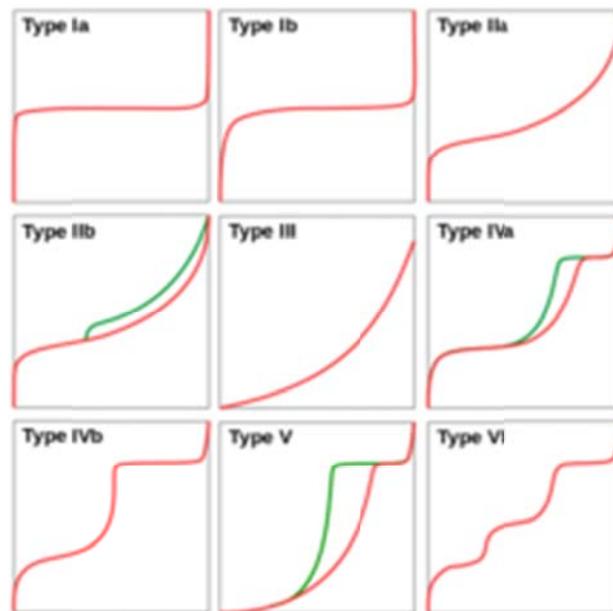


Figure III-17 : Classification des isothermes d'adsorption (en rouge) et de désorption (en vert).

Les isothermes d'adsorption/désorption sont mesurées expérimentalement à partir de plusieurs méthodes :

### **III.5.5.1 La méthode des solutions salines saturées**

Appelée aussi méthode aux dessiccateurs (La norme ISO 12571)[49]. L'essai est réalisé dans une enceinte fermée et maintenue à une température fixe, il consiste à balayer plusieurs paliers d'humidité relative HR. Pour chaque palier d'humidité relative, les échantillons sont pesés régulièrement jusqu'à atteindre l'équilibre. L'humidité relative est réglée à l'aide des solutions salines saturées. En effet, une solution sursaturée en sel au sein d'un système fermé influence l'humidité relative du volume d'air considéré.

### **III.5.5.2 La méthode en chambre climatique**

La norme ISO 12571[49] spécifie une autre méthode pour déterminer les propriétés de sorption des matériaux poreux de construction, il s'agit de la méthode en chambre climatique. L'humidité relative et la température peuvent être réglées automatiquement par une chambre climatique. La durée de l'essai dépend principalement de la nature du matériau, et de la taille de l'échantillon à analyser.

Cette méthode classique d'évaluation des isothermes d'adsorption et de désorption est généralement critiquée en raison de sa lenteur. Pour cela, plusieurs dispositifs de mesure d'isothermes de sorption-désorption permettent de réduire considérablement le temps de mesure.

### **III.5.5.3 Méthode Gravimétrique**

Cette méthode est appelée aussi méthode dynamique. Elle est basée sur le suivi permanent de la masse de l'échantillon jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint selon les critères fixés, à une température donnée. En outre, ce procédé nous permet d'accéder à la teneur en eau du matériau à partir de la masse sèche de l'échantillon pour chaque palier d'humidité relative, afin de tracer la totalité de la courbe d'isotherme de sorption. Parmi les dispositifs utilisant la méthode gravimétrique, nous pouvons citer le DVS (Dynamic Vapor Sorption) et le VSA (Vapor Sorption Analyzer), (Anderberg, 2008)[50].

#### **III.5.5.3.1 DVS (Dynamic Vapor Sorption)**

La méthode dynamique DVS est utilisée pour la détermination des isothermes d'adsorption et de désorption de la vapeur d'eau. L'échantillon à analyser est de faible masse, par conséquent

la masse adsorbée est encore plus faible. De plus l'échantillon est soumis à de la convection forcée, ce qui permet de réduire le temps de l'essai et d'accélérer la mesure.

### **III.5.5.3.2 VSA (Vapor Sorption Analyzer)**

Le VSA est un autre dispositif basé sur les méthodes gravimétriques comme le DVS. Il permet de mesurer les isothermes d'adsorption et désorption dynamique de la vapeur d'eau des échantillons de taille plus importante par rapport au DVS (un cylindre de 40 mm de diamètre et 6 mm d'épaisseur). Néanmoins, sa balance est moins sensible  $\pm 0.1 \text{ mg}$ .



Figure III-18 : Dispositif gravimétrique de mesure des isothermes de sorption à droite VSA, et à gauche : DVS

### **III.5.5.4 Méthode volumétrique**

Les méthodes volumétriques sont basées sur la mesure du volume de vapeur d'eau adsorbé ou désorbé par un matériau. Le Belsorp Aqua 3 décrit dans la figure 17 est un dispositif de mesure automatique de la variation du volume de la vapeur d'adsorption/désorption à une température donnée. Le processus de mesure consiste à la mesure du volume mort de gaz dans le système de mesure par injection de l'Hélium à pression atmosphérique. Puis, la quantité adsorbée est calculée à partir de la variation de pression de gaz.



Figure III-19 : Dispositif volumétrique de mesure des isothermes de sorption : Belsorp-aqua3

### III.5.5.5 Comparaison entre les méthodes :

Des travaux de comparaison entre les différents dispositifs d'évaluation des isothermes d'adsorption et de désorption de plusieurs matériaux de construction sont faits, les travaux de Abahri (2012)[51] s'intéressent à caractériser deux matériaux biosourcés : isolant en fibre en bois et OBS(Oriented Strand Board) obtenus par DVS, VSA et le BELSORP-aqua3 comme indiqués sur la figure 18.

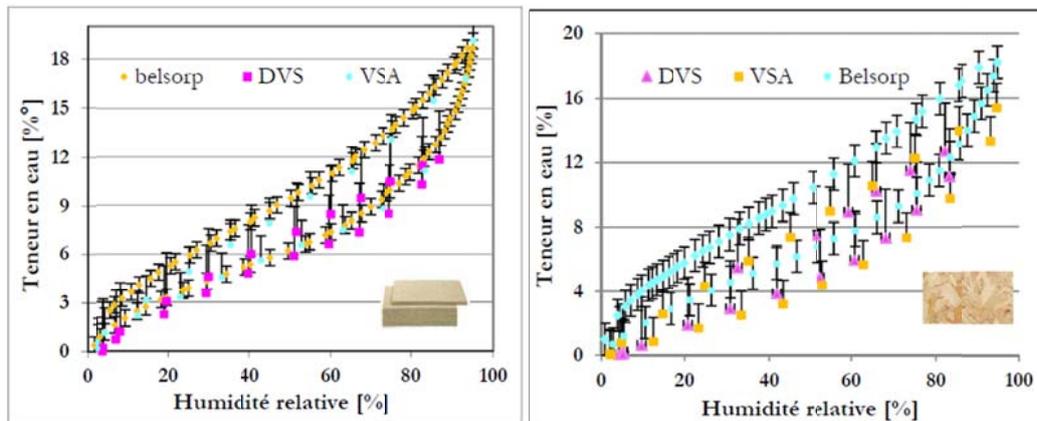


Figure III-20 : Comparaison des isothermes de sorption à 20°C obtenues par différentes méthodes [51]

Les travaux de Ferroukhi (2015)[41], pour le bois aggloméré, le parpaing et le brique, des résultats obtenus sont illustrés dans la figure 19.

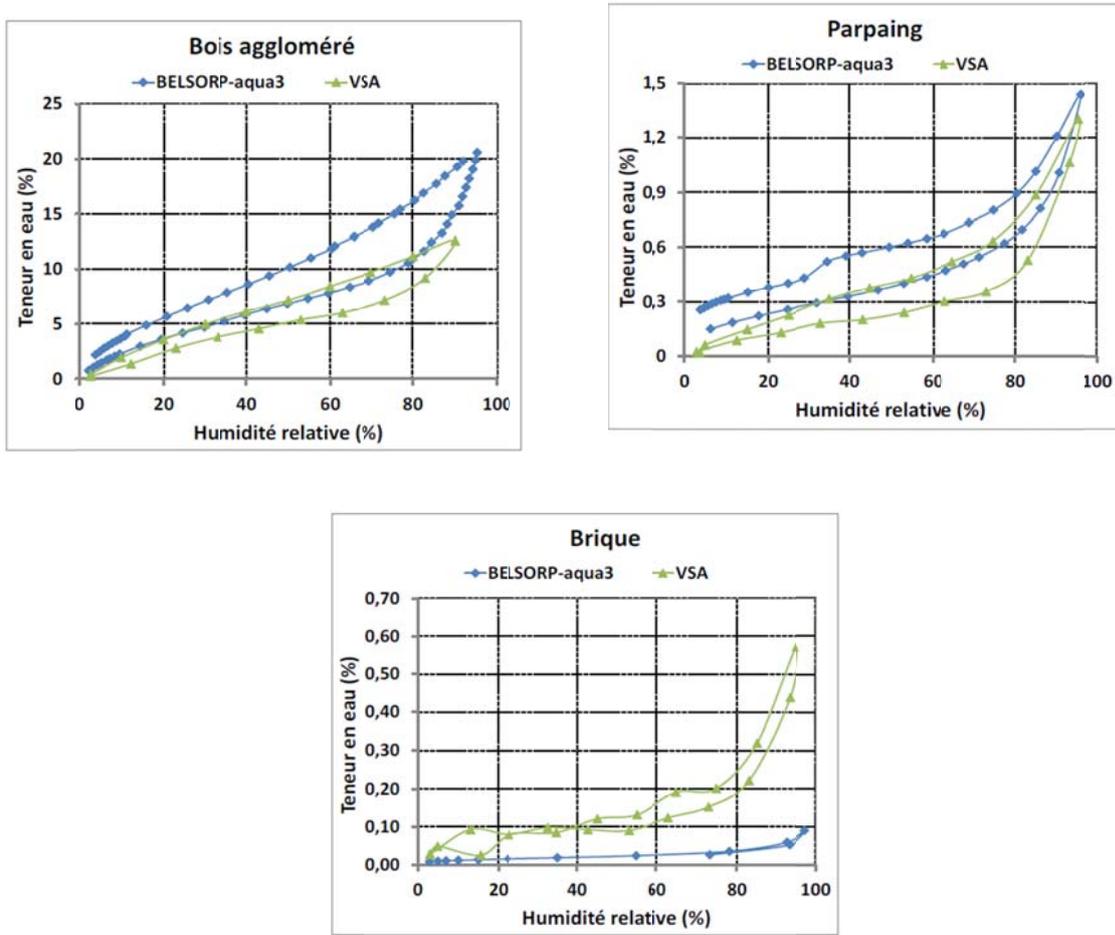


Figure III-21 : Comparaison des isothermes d'adsorption/désorption obtenues par deux méthodes différentes : gravimétrique et volumétrique [41]

Ces comparaisons mettent en exergue un inconvénient majeur de la méthode DVS. En effet cette dernière ne permet pas de mesurer les teneurs en eau pour des plages supérieures à 90% en humidité relative. Cette zone de la courbe est généralement déduite par extrapolation. La courbe obtenue par le Belsorp s'écarte de celles obtenues par DVS et VSA dans le cas de l'OSB (figure 18). En effet, pour certains types de matériaux, les méthodes gravimétrique et volumétrique ne donnent pas toujours des résultats identiques. Donc, la détermination des isothermes est fortement dépendante de la méthode expérimentale utilisée et particulièrement de l'estimation de l'équilibre thermodynamique pour chacun des points de la courbe. La méthode gravimétrique ISO 12571[49] reste finalement, la méthode la plus réaliste et la plus fiable vu le respect de la représentativité des échantillons. Néanmoins, elle a été souvent critiquée à cause de sa lenteur et de la précision de sa balance.

### III.5.6 Modèles d'isothermes de sorption-désorption

Plusieurs modèles connus dans la littérature qui décrivent le phénomène d'adsorption (Duong, D, 1998 ; Furmaniak, S, 2007)[52][53]. On y trouve des modèles théoriques, semi-théoriques ou encore empiriques. Les modèles BET et GAB sont les plus utilisés.

#### III.5.6.1 Modèle de Langmuir

(Langmuir, 1918)[54] décrit l'adsorption monocouche des molécules dans le domaine hygrosopique comme suit :

$$u = \frac{m * C_{langmuir} * Hr}{1 + C_{langmuir} * Hr}$$

Où  $m$  est la teneur en eau adsorbée maximale et le terme  $C_{Langmuir}$  est exprimé en fonction de la chaleur latente d'adsorption  $L_{ad}$  comme suit [45] (J.-F. Daïan, 2013)[45] :

$$C_{langmuir} = \exp\left(\frac{M_1 * L_{ad}}{R * T}\right)$$

Ce modèle est limité au domaine des faibles humidités relatives.

#### III.5.6.2 Modèle BET

Le modèle BET, comme son nom l'indique, a été développé par (S. Brunauer, P. H. Emmett et E. Teller, 1938)[44], Ce modèle est basé sur la théorie de Langmuir et se distingue par le fait que plusieurs couches peuvent venir se superposer sur la première couche adsorbée. Le modèle BET est basé sur les hypothèses suivantes :

- L'adsorption se fait en multicouche.
- L'adsorption est localisée sur des sites bien définis et énergiquement identiques, ce qui suppose l'existence d'une surface homogène.
- L'existence d'un équilibre permanent entre les molécules adsorbées et les molécules désorbées dans toutes les étapes du processus d'adsorption.

La forme classique de l'équation BET s'écrit :

$$u = \frac{m * C_{BET} * Hr}{(1 - Hr)(1 + (C_{BET} - 1) Hr)}$$

Avec :

- $u$  : teneur en eau massique à l'équilibre.
- $hr$  : humidité relative.
- $m$  : capacité monocouche.
- $C_{BET}$  : constante cinétique reliée à l'adsorption de la première couche.

### **III.5.6.3 Modèle GAB**

Ce modèle est développé par Guggenheim, Anderson et de Boer (GAB). Ce modèle repose sur le modèle BET avec un coefficient correcteur  $K$  prenant en compte la chaleur adsorbée de toutes les couches moléculaires. On le dit polyvalent à tel point qu'il est utilisé dans plusieurs disciplines notamment l'agroalimentaire, le génie chimique ou encore le génie civil (Furmaniak. S, 2007-a)[55].

$$u = \frac{m * C_{GAB} * K * Hr}{(1 - K * Hr)(1 + K(C_{GAB} - 1)Hr)}$$

$C_{GAB}$  est exprimée en fonction de la température de référence ( $T_{ref}$ ) et de la chaleur de sorption du matériau ( $Q$ ) comme suit (Staudt. P.B, 2013)[56] :

$$C_{GAB}(T) = C_{GAB}(T_{ref}) \exp\left(\frac{Q}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right)$$

Ce modèle permet une modélisation des isothermes de sorption jusqu'à 90% d'humidité relative.

### **III.5.6.4 Modèle GDW**

Le modèle GDW (Generalised D'Arcy and Watt) est également basé sur la théorie de Langmuir. Il suppose que plusieurs molécules de vapeur d'eau peuvent être adsorbées sur chaque molécule appartenant aux sites d'adsorption secondaires (Furmaniak.S, 2007-b)[53].

$$u = \frac{m * K * Hr}{(1 + K * Hr)} \frac{1 - K(1 - w) * Hr}{(1 - K * Hr)}$$

Où  $w$  est la proportion de molécules adsorbées sur les sites primaires qui deviennent des sites secondaires d'adsorption.

### III.5.7 La tortuosité

Comme son nom l'indique, la tortuosité traduit le caractère sinueux du chemin qu'emprunte une particule fluide pour traverser le milieu poreux. Elle est définie par le carré du rapport entre la longueur moyenne de l'écoulement dans le milieu poreux  $L_e$  à la longueur du matériau mesurée dans la direction macroscopique de l'écoulement  $L$  :

$$\tau = \left( \frac{L_e}{L} \right)^2$$

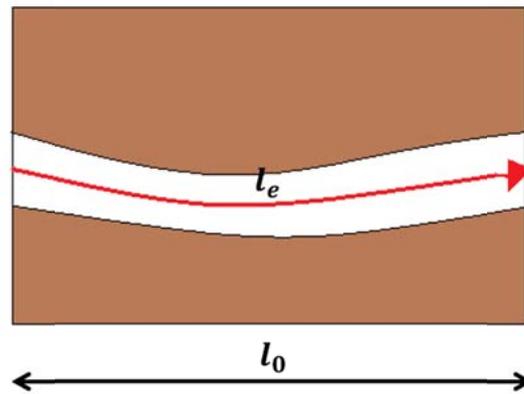


Figure III-22 : Illustration schématique de la tortuosité

La tortuosité n'est pas mesurable, car il n'est pas possible de mesurer la longueur  $L_e$  mais elle peut être calculée dans certains cas simples (sphères empilées de même diamètre). Dans un milieu poreux, elle est comprise entre 1 et 3 (Dullien 1979)[57].

Dans les milieux homogènes isotropes,  $\tau$  est une fonction de la porosité ouverte et peut être prise entre 1 et  $\sqrt{3}$ . Pour la plupart des arrangements compacts,  $\tau$  est proche de 1,15 (Brakel, 1974)[58].

### III.5.8 Perméabilité à la vapeur d'eau :

Tout comme la température qui se déplace des zones plus élevées vers des zones plus basse, l'humidité se déplace des zones de forte concentration vers des zones à faible concentration. on parle de la diffusion de la vapeur d'eau. La perméabilité à la vapeur exprime la quantité de vapeur transmise à travers une surface par unité de temps, de pression et d'épaisseur. Elle permet de caractériser des propriétés d'étanchéité/fuite et la migration d'humidité dans ces matériaux, qui est généralement attribuée à un processus de diffusion de vapeur. Cette propriété dépend de la nature du matériau et de la pression de vapeur appliquée sur

l'échantillon (Trechsel 2001)[59]. En revanche, l'influence de l'humidité relative est peu observée pour les matériaux non-hygroscopiques Talukdar 2007 [60]. De plus la température a une influence significative sur la perméabilité à la vapeur (Ferroukhi 2015 [41], Galbraith 1998 [61], Galbraith 2000[62]).

La perméabilité à la vapeur est évaluée par la méthode de la coupelle, moyennant le dispositif Gravitest qui permet de lancer six échantillons à la fois (cf. Figure 23). Ce test est normalisé sous la norme NF EN ISO 12572[63]. Cette grandeur est mesurée dans des conditions isothermes, en imposant de part et de l'autre de l'échantillon une pression de vapeur d'eau fixe, ce qui engendre un flux de vapeur déterminé par l'exploitation de la loi de Fick à l'équilibre. La pression de vapeur dans la coupelle est régulée à l'aide des solutions salines.

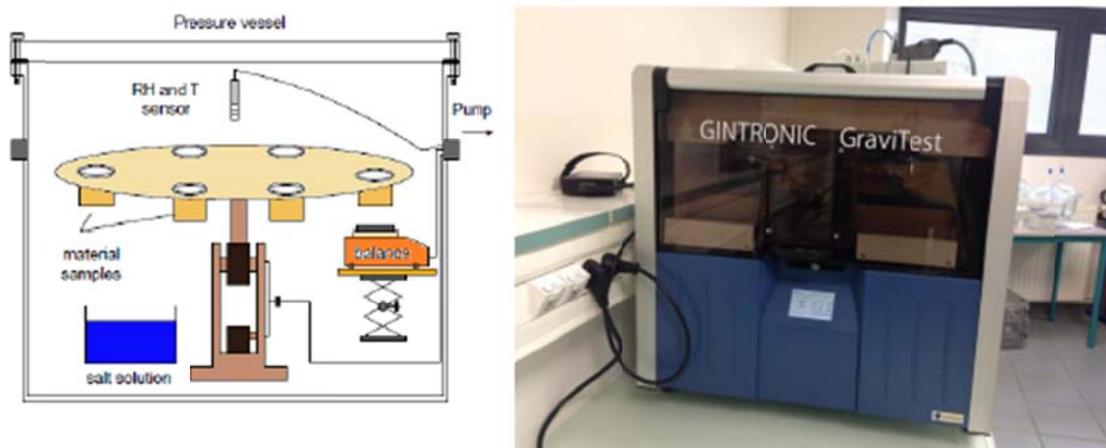


Figure III-23 : Dispositif Gintronic-Gravitest et son principe de fonctionnement –LaSIE-

Les masses de chaque coupelle sont mesurées à intervalle de temps réguliers jusqu'à la vérification du critère d'équilibre.

$$\frac{m(t) - m(t + 48h)}{m(t + 48h)} \leq 0.1\%$$

Le suivi gravimétrique de la coupelle permet de déterminer la variation de masse au cours du temps. Cette variation est exprimée par la relation suivante

$$G_{12} = \left| \frac{m_1 - m_2}{t_1 - t_2} \right| \quad (kg / s)$$

$G_{12}$  [kg/s]: représente le taux de variation massique

### Chapitre III

$m_1$  et  $m_2$  [kg] sont respectivement les masses de la coupelle correspondantes à des temps successifs  $t_1$  et  $t_2$  [s].

L'essai se termine lorsque cinq mesures successives de  $G_{12}$  atteint une valeur comprise entre  $\pm 5\%$  de  $G$ , avec  $G$  la moyenne de cinq déterminations successives pour chaque coupelle. La densité du flux de vapeur d'eau est ensuite donnée par :

$$j_v = \frac{G}{A} \quad (\text{kg} / \text{m}^2 \text{s})$$

Où :  $j_v$  [kg/m<sup>2</sup>s] est la densité du flux de vapeur d'eau ;

$A$  [m<sup>2</sup>] est la surface de l'échantillon.

La variation de masse est représentée en fonction du gradient de pression de vapeur d'eau imposé. L'utilisation de la loi de diffusion de Fick (1855)[64] nous permet alors de définir la perméabilité à la vapeur d'eau telle que :

$$\delta_p = J_v \frac{e}{\Delta p_v} \quad (\text{kg} / \text{m.s.Pa})$$

Avec  $\delta_p$  : est la perméabilité du matériau à la vapeur d'eau ;

$e$  [m] est l'épaisseur de l'échantillon ;

Et  $\Delta p_v$  [Pa] est le gradient de pression de vapeur d'eau.

Dans la pratique, la perméabilité à la vapeur d'eau donnée par le Gravitest ne correspond pas à celle déterminée théoriquement par l'équation précédente. En effet, cette grandeur est valable que pour le cas où le mélange parfait de l'air est considéré sur les deux faces de l'échantillon. De ce fait, une correction est possible afin de prendre en compte les résistances hydriques des faces supérieures et inférieures ainsi que la couche d'air à l'intérieure de la coupelle séparant l'échantillon de la solution saline saturée. La Figure 24 illustre les résistances prisent en compte dans la correction de la perméabilité à la vapeur d'eau.

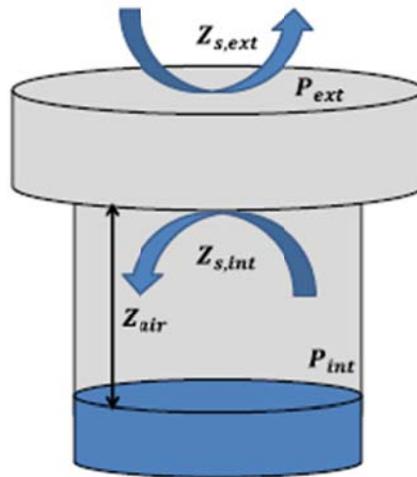


Figure III-24 : Représentation des résistances à la vapeur d'eau introduites dans la méthode de la coupelle

La perméabilité à la vapeur d'eau corrigée est donnée par la relation suivante :

$$\delta_{p,corr} = \frac{e}{\frac{\Delta p_v}{J_v} - (Z_{air} + Z_{s,int} + Z_{s,ext})} \quad (\text{kg} / \text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$$

$\delta_{p,corr}$  : est la perméabilité à la vapeur d'eau réelle ;

$Z_{air} = d / \delta_a$  [s/m] : la résistance à la vapeur d'eau dans la couche d'air séparant la solution saline saturée et le matériau ;

$d$  [m] : est l'épaisseur de la couche d'air ;

$\delta_a$  [kg/(m·s·Pa)] la perméabilité de la vapeur d'eau dans l'air ;

$Z_{s,ext} = 1/h_{mint/ext}$  [s/m] représente la résistance à la diffusion superficielle de la vapeur d'eau ;

$h_m$  [kg/(m<sup>2</sup>·s·Pa)] le coefficient de transfert massique par convection.

(Ferroukhi Y ,2015)[41] a testé trois échantillons de chaque matériau. Les perméabilités à la vapeur d'eau moyennes pour les matériaux étudiés sont résumées sur la Figure III-25.

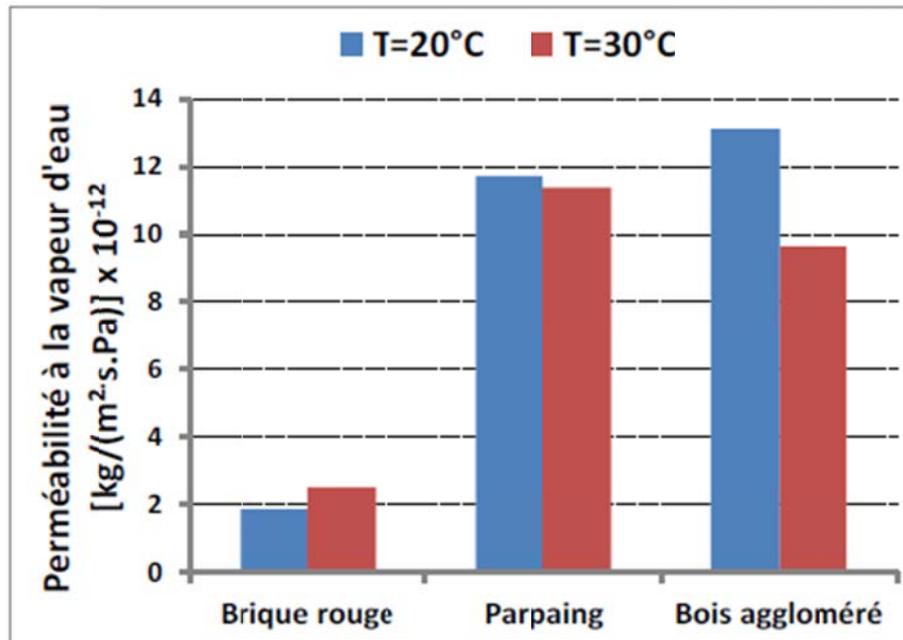


Figure III-25 : Evaluation de la perméabilité à la vapeur d'eau en fonction de la température pour la brique, le parpaing et le bois aggloméré (Ferroukhi Y,2015) [41].

L'analyse des résultats présentés sur la Figure 25 montre que l'influence de la température varie d'un matériau à un autre. Pour la brique, la perméabilité à la vapeur d'eau augmente avec la hausse de température, l'écart relatif entre la perméabilité à la vapeur d'eau à 20°C et celle obtenue à 30°C est de 35% ce qui n'est pas négligeable. Pour le parpaing et le bois aggloméré, le comportement inverse est constaté, car la perméabilité à la vapeur d'eau diminue avec la hausse de la température. Pour le bois aggloméré, la baisse de la perméabilité à la vapeur d'eau pour une température de 30°C est de l'ordre de 30% par rapport à celle de 20°C. Concernant le parpaing, l'impact de la température sur la perméabilité à la vapeur d'eau est moins flagrant avec une différence de seulement 5%.

### III.5.9 Isotherme de sorption

L'étude des propriétés hydrique notamment les isothermes de sorption et la perméabilité à la vapeur d'eau, etc., prennent au minimum une durée de 7 à 10 jours selon la nature du matériau testé, ce qui n'est pas pris en considération lors de l'analyse en fonction de l'âge. Afin de remédier à ce problème, plusieurs techniques d'arrêt d'hydratation du ciment avant d'entamer l'essai existent.. Il est constaté par (Issaadi. N, 2015[38]) que la technique la plus adéquate pour l'arrêt de l'hydratation est celle par immersion sous vide dans un bain d'acétone pendant 7 jours suivis d'une mise sous vide (sans acétone) pendant 3 jours. La

Figure III-26 montre l'influence de l'âge sur les propriétés hydriques (le taux d'adsorption et de désorption et la perméabilité à la vapeur d'eau) et l'évolution de ces propriétés en fonction de l'âge.

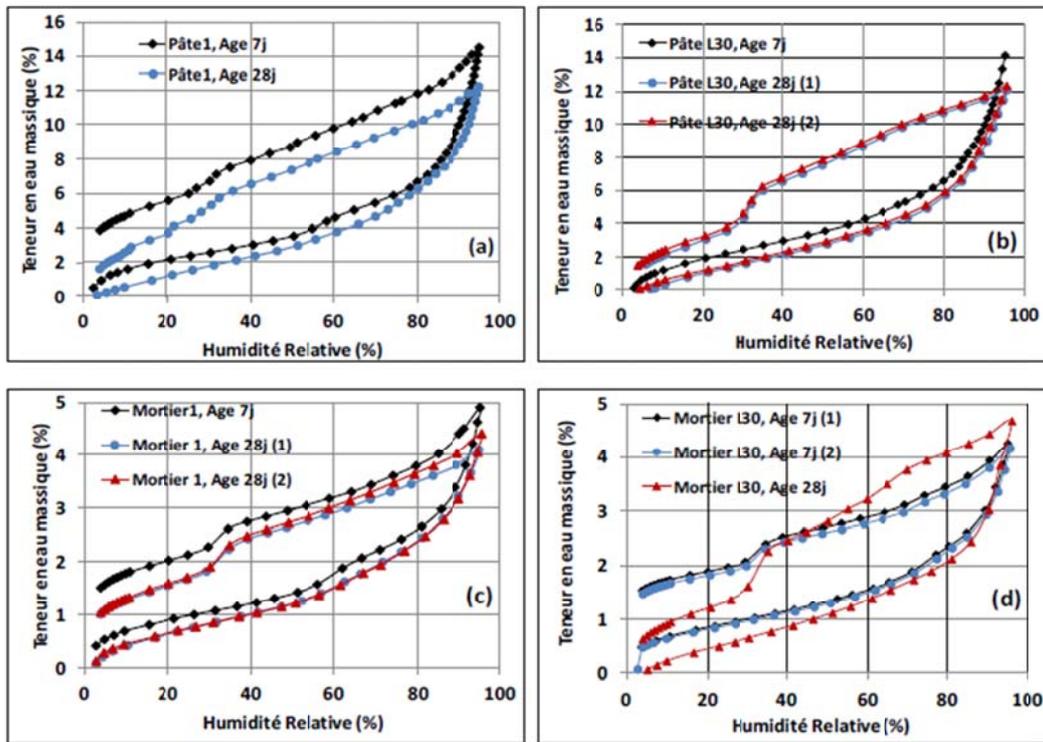


Figure III-26 : Comparaison des isothermes d'adsorption et de désorption de la vapeur d'eau à 20°C à 7 et 28 jours de : (a) pâte de ciment 1, (b) pâte de ciment L30, (c) mortier 1 et (d) mortier L30 [38]

### III.6 Modèles mathématiques de transferts hygrothermiques dans les matériaux poreux

La modélisation des transferts couplés de chaleur et d'humidité a été étudiée par plusieurs chercheurs. L'objectif est de mieux comprendre les effets des échanges de masse et de chaleur à travers l'enveloppe de bâtiment sur la durabilité et sur la consommation énergétique de ces derniers. De nombreux modèles macroscopiques de transfert utilisant des paramètres d'entrées et des variables, basées sur le principe de conservation de masse et d'énergie ont été réalisés. Ces modèles couplés de transfert sont des équations aux dérivées partielles « EDP » dont la résolution se fait par la méthode des éléments finis « MEF » ou différences finis « MDF » tout en appliquant les conditions environnementales (conditions initiales et aux limites). Ces modèles se différencient principalement dans le choix des moteurs de transfert considérés ainsi que sur les hypothèses adoptées qui sont parfois sujettes à de nombreuses critiques.

### III.6.1 Modèle de Luikov

(Luikov, 1966) a été l'un des premiers chercheurs à proposer un modèle prenant en compte le couplage thermo-hydrique dans les matériaux poreux. Il considère que la diffusion de la vapeur d'eau dépend d'une part, du gradient de teneur en eau massique ( $u$ ) et de la température ( $T$ ) et d'autre part, du gradient de pression totale ( $P$ ) à l'intérieur du matériau poreux (Trabelsi, 2010). Il propose toutefois de séparer les flux de vapeur et liquide.

$$\text{Flux de vapeur : } \vec{j}_v = -a_{mv} \gamma_0 \left( \vec{\nabla} u + \delta_v \vec{\nabla} T + \lambda_{pv} \vec{\nabla} P \right)$$

Avec :

$a_{mv}$  : Coefficient de diffusion de la vapeur d'eau au sein du matériau poreux ;

$\gamma_0$  : Poids volumique du matériau à l'état sec ;

$\delta_v$  : Coefficient de gradient thermique pour le transfert de la vapeur d'eau ;

$\lambda_{pv}$  : Conductivité de transfert molaire de vapeur.

$$\text{Flux liquide : } \vec{j}_l = -a_{ml} \gamma_0 \left( \vec{\nabla} u + \delta_l \vec{\nabla} T + \lambda_{pl} \vec{\nabla} P \right)$$

Avec :

$a_{ml}$  : Coefficient de diffusion de l'eau en phase liquide ;

$\delta_l$  : Coefficient de gradient thermique pour le transfert de l'eau liquide ;

$\lambda_{pl}$  : Perméabilité à l'eau.

Enfin, l'équation de conservation de la masse s'écrit comme suit :

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -a_m \left( \vec{\nabla}^2 u + \delta \vec{\nabla}^2 T + \delta_p \vec{\nabla}^2 P \right)$$

Avec :

$a_m$  : Coefficient de diffusion d'humidité ;

$\delta$  : Coefficient de gradient thermique ;

$\delta_p$  : Perméabilité apparente à l'air.

De plus, dans le bilan énergétique, Luikov a négligé le transfert de chaleur convectif et radiatif. Les flux de chaleur considérés sont uniquement dus à la conduction et au changement de phase.

$$c\gamma_0 \frac{\partial T}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot (\lambda \vec{\nabla} T) + L_{vl} \vec{\nabla} \cdot (\vec{j}_v)$$

Luikov a proposé l'équation qui représente la variation de la pression totale en faisant un bilan de masse uniquement sur la phase vapeur et en ne considérant que la différentielle en pression.

$$c_a \gamma_0 \frac{\partial P}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot (k \vec{\nabla} P) + I_v$$

Avec :

$c_a$  : Capacité d'humidité du corps capillaire poreux ;

$k$  : Perméabilité à la vapeur ;

$I_v$  : Terme source de la vapeur d'eau.

En considérant la teneur en eau massique comme moteur de transfert, qui est un paramètre non continu dans les transferts au sein d'une paroi multicouche. Pour pallier ce problème, Luikov a introduit la notion de potentiel de transfert de masse qui aurait la particularité d'être continu tout au long de l'ensemble et de varier dans le même sens que la teneur en eau massique.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a_q \vec{\nabla}^2 T + \varepsilon_{vl} L_{vl} \frac{c_m}{c_q} \frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{c_{pq} k}{c_q \gamma_0} \vec{\nabla} P \vec{\nabla} T$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a_m \left( \vec{\nabla}^2 \theta + \delta' \vec{\nabla}^2 T + \delta'' \vec{\nabla}^2 P \right)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = a_p \left( \vec{\nabla}^2 P + \varepsilon_{vl} \frac{c_m}{c_a} \frac{\partial \theta}{\partial t} \right)$$

$a_q$  : Diffusivité thermique ;

$a_m = a_{mv} + a_{ml}$  : Coefficient de diffusion d'humidité ;

$a_p$  : Coefficient de diffusion du mélange vapeur d'eau-gaz ;

$\delta'$  : Coefficient de gradient thermique ;

### Chapitre III

$$\delta'' = \lambda_p / \lambda_m :$$

Rapport de transfert de masse ;

$\varepsilon_{vl}$  : Facteur de conversion de phase ;

$c_q ; m ; p_q$  : Respectivement la capacité thermique massique, capacité d'humidité et capacité thermique massique du mélange vapeur d'eau-gaz ;

$L_{vl}$  est la chaleur latente d'évaporation.

Ce modèle a été raffiné dans beaucoup de travaux de recherche (Qui, 2007[65], Abahri, 2012 [51]; Trabelsi, 2010[66] ; Ferroukhi, 2014[67]). La difficulté majeure de ce modèle réside d'une part, dans la détermination des paramètres du modèle en séparant le transfert de la phase liquide et vapeur et d'autre part dans la détermination du coefficient de gradient thermique. Un banc expérimental a été proposé à cet effet dans les travaux de recherche de (Trabelsi, 2010) [66] pour l'évaluation de ce coefficient.

#### III.6.2 Modèle de Philip & De Vries

(Philip & De Vries, 1957) [68] ont décrit le flux diffusif comme étant fonction de la teneur en eau volumique et de la température. Ils ont considéré le transport de vapeur comme un processus diffusionnel régi par la loi de Fick (1855)[64].

$$\text{Flux de vapeur : } \frac{j_v}{\rho_l} = -D_{\theta vap} \bar{\nabla} \theta - D_{T vap} \bar{\nabla} T$$

Avec :

$D_{\theta vap}$  : Coefficient de diffusion isotherme de la vapeur d'eau ;

$D_{T vap}$  : Coefficient de diffusion non-isotherme de la vapeur d'eau ;

Le flux en phase liquide qui découle de la loi de Darcy est exprimé par (Philip & De Vries, 1957) [68] en fonction de la teneur en eau volumique et de la température comme suit :

$$\frac{j_l}{\rho_l} = -D_{\theta l} \bar{\nabla} \theta - D_{T l} \bar{\nabla} T - K$$

$D_{\theta l}$  : Coefficient de diffusion isotherme d'eau liquide ;

$D_{T l}$  : Coefficient de diffusion non-isotherme d'eau liquide ;

$K$  : Perméabilité à l'eau liquide.

Comme Luikov, Philip & De Vries ont négligé les transferts convectif et radiatif.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot (\lambda \vec{\nabla} T) + L_{vl} \vec{\nabla} \cdot (D_{\theta vap} \vec{\nabla} \theta)$$

Le système d'équations décrivant les transferts couplés de chaleur et d'humidité dans les matériaux poreux selon (Philip & De Vries, 1957) [68] est le suivant :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial t} &= \vec{\nabla} \cdot (D_{\theta} \vec{\nabla} \theta) + \vec{\nabla} \cdot (D_T \vec{\nabla} T) + \vec{\nabla} K \\ \rho c \frac{\partial T}{\partial t} &= \vec{\nabla} \cdot (\lambda \vec{\nabla} T) + L_{vl} \vec{\nabla} \cdot (D_{\theta vap} \vec{\nabla} \theta) \end{aligned}$$

Avec :

$D_T$  : Coefficient de diffusion d'humidité non isotherme ;

$D_{\theta}$  : Coefficient de diffusion d'humidité isotherme ;

$C$  : Chaleur spécifique du matériau ;

$\lambda$  : Conductivité thermique.

Ce modèle utilise la teneur en eau volumique comme moteur de transfert d'où le problème de discontinuité lors de l'étude des parois multicouches. De plus, il ne permet pas de prendre en compte les évolutions de la pression dans le matériau. Il est souvent utilisé dans la modélisation du séchage.

### III.6.3 Modèle de Künzle

(Künzle, 1995)[69] a proposé une nouvelle équation d'équilibre (Qin, 2007) [65]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot (D_{Hr} \vec{\nabla} Hr + \delta_p \vec{\nabla} P_v)$$

Où  $D_{Hr}$  dépend de la température et de la teneur en eau et  $\delta p$  dépend uniquement de la température. D'après Künzle [69], le flux liquide est régi par un gradient d'humidité relative et le flux de vapeur par un gradient de pression de vapeur.

Les équations décrivant le modèle de Künzle sont :

### Chapitre III

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \overline{\nabla} \cdot (\lambda \overline{\nabla} T) + L_v \overline{\nabla} \cdot (\delta_p P_{vsat} \overline{\nabla} HR)$$
$$\frac{\partial u}{\partial HR} \frac{\partial HR}{\partial t} = \overline{\nabla} \cdot (D_{HR} \overline{\nabla} HR + \delta_p \overline{\nabla} P_v)$$

Avec :

$\partial u / \partial HR$  : Pente de l'isotherme de sorption ;

$L_v$  : Chaleur latente de vaporisation ;

$\delta_p$  : Perméabilité à la vapeur d'eau ;

$P_{vsat}$  : Pression de vapeur saturante ;

$D_{HR}$  : Coefficient de diffusion liquide.

Ce modèle développé par Künzeli appartient à Fraunhofer Institut für Bauphysic (IBP) et est commercialisé sous le nom de WUFI (Wärme und Feuchte Instationär).

En plus de ces modèles qui sont considérés comme modèle de référence des transferts couplés de chaleur et d'humidité, nous pouvons citer aussi le modèle de (Duforestel, 1992)[70], de Hagentoft et al., 2004)[71] ...etc.

#### III.6.4 Synthèse des modèles de transfert de chaleur et de masse développés au LaSIE

Le bâtiment est le lieu dans lequel l'homme passe plus de 80% de sa vie. Une enveloppe de bâtiment est soumise aux différentes sollicitations dynamiques de l'environnement extérieur (l'ensoleillement, pluie, vent, température, humidité), ou de l'ambiance intérieure (chauffage, climatisation, ventilation, et même les habitants eux-mêmes qui représentent une source de chaleur et d'humidité)

Dans ce qui suit, nous présentons plusieurs travaux qui existent dans la littérature, basés sur l'approche de (Luikov, 1966)[72] où les moteurs de transfert se différencient (chaleur, teneur en eau, humidité, pression de vapeur/ pression capillaire, pression totale/ teneur en vapeur) et, par conséquent, par le type des dispositifs expérimentaux nécessaires pour l'évaluation des paramètres d'entrée de ces modèles (Trabelsi, 2010)[66]. Ils sont basés sur les principes de conservation d'énergie et de masse.

Tableau III-4 : Synthèse des modèles de prédiction développés au LaSIE

| Modèle développé                         | Equations constitutives  | Paramètres d'entrée  |
|--|--|--|
| (Qin et Belarbi, 2005)[73]               | $C\rho_s \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + C_m \rho_s (\sigma L_{vl} + \gamma) \frac{\partial m}{\partial t}$ $C_m \rho_s \frac{\partial m}{\partial t} = D_m \frac{\partial^2 m}{\partial x^2} + D_m \delta \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$  | $\rho_s, \lambda, C, C_m, \delta, D_m$                                 |
| (Qin, 2008)[74]                          | $C\rho_s \frac{\partial T}{\partial t} = \bar{\nabla} \cdot (\lambda \bar{\nabla} T) + C_m \rho_s (\sigma L_{vl} + \gamma) \frac{\partial \rho_v}{\partial t}$ $C_m \rho_s \frac{\partial \rho_v}{\partial t} = \bar{\nabla} \cdot (\delta \bar{\nabla} \rho_v + \varepsilon \delta \bar{\nabla} T)$   | $\rho_s, \lambda, C, C_m, \delta$                                      |
| (Trabelsi, 2010)[66]                     | $C(\theta_l) \rho_s \frac{\partial T}{\partial t} = \bar{\nabla} \cdot (\lambda(\theta_l) \bar{\nabla} T) + C_m \rho_s (\sigma L_{vl} + \gamma) \frac{\partial \rho_v}{\partial t}$ $C_m \rho_s \frac{\partial \rho_v}{\partial t} = \bar{\nabla} \cdot (\delta(\theta_l, T) \bar{\nabla} \rho_v + \varepsilon \delta(\theta_l, T) \bar{\nabla} T)$  | $\rho_s, \lambda(\theta_l), C(\theta_l), C_m, \delta(\theta_l, T)$     |
| (Remki, 2012),[75]<br>(Abahri, 2012)[51] | $C\rho_s \frac{\partial T}{\partial t} = \bar{\nabla} \cdot (a_t \bar{\nabla} T + \delta_t \bar{\nabla} u + \alpha_t \bar{\nabla} P) + h_{lv} \rho_s \frac{\partial w}{\partial t}$ $\frac{\partial w}{\partial t} = \bar{\nabla} \cdot [D_m (\bar{\nabla} w + \delta \bar{\nabla} T + \alpha \bar{\nabla} P)]$ $h_a \frac{\partial P}{\partial t} = \bar{\nabla} \cdot (\lambda_f \bar{\nabla} P) + \rho_s \chi \frac{\partial w}{\partial t}$      | $\rho_s, \lambda, C, C_m, \delta$                                      |
| (Ferroukhi, 2015)[41]                    | $C\rho_s \frac{\partial T}{\partial t} = \bar{\nabla} \cdot (\lambda \bar{\nabla} T + \alpha \bar{\nabla} P_v + \gamma \bar{\nabla} P) + L_v \rho_s \sigma \frac{\partial P_v}{\partial t}$ $C_a \frac{\partial P}{\partial t} = \bar{\nabla} \cdot (k_f \bar{\nabla} P)$ $C_m \rho_s \frac{\partial P_v}{\partial t} = \bar{\nabla} \cdot (k_m \bar{\nabla} P_v + k_t \bar{\nabla} T + k_f \bar{\nabla} P)$   | $\rho_s, \lambda, C, C_m, \delta$                                      |
| (Issaadi, 2015)[38]                      | $C\rho_s \frac{\partial T}{\partial t} = \bar{\nabla} \cdot (a_t \bar{\nabla} T + \delta_t \bar{\nabla} u + \alpha_t \bar{\nabla} P) + h_{lv} \rho_s \chi \frac{\partial w}{\partial t}$ $h_a \frac{\partial P}{\partial t} = \bar{\nabla} \cdot [\lambda_t \bar{\nabla} P] + \rho_s \chi \frac{\partial w}{\partial t}$ $\frac{\partial w}{\partial t} = \bar{\nabla} \cdot [D_m (\bar{\nabla} w + \delta \bar{\nabla} T + \alpha \bar{\nabla} P)]$ | $\frac{\partial w}{\partial \varphi}, \rho_s, \lambda, C, C_m, \delta$ |

Les modèles de transfert couplé de chaleur et d'humidité dans les matériaux poreux de construction sous un système d'équation aux dérivés partielles, cité dans le Tableau III-4, sont

développés au laboratoire LaSIE, où la résolution de ce modèle couplé est établie par la solution analytique [73], par la méthode des différences finis [74] et par la méthode des éléments finis [66][51][75][41][38].

### **III.7 Modélisation expérimentale de transfert de masse et de chaleur dans les matériaux poreux**

L'analyse du comportement hygrothermique des parois de bâtiment à l'échelle intermédiaire fait objet de plusieurs travaux dans la littérature, qui porte sur la confrontation d résultats prédits par les modèles mathématiques et les résultats expérimentaux. Qin et al. [76] ont présenté une configuration expérimentale, en deux chambres climatiques. La première simule les conditions extérieures contrôlées en température et en humidité par un système de climatisation, et la deuxième représente l'ambiance intérieure. L'air de circulation est propagé par un système de ventilation conditionné par un radiateur électrique. L'humidité relative a été générée par une solution saline saturée. La mise en œuvre du dispositif a été opérée pendant 45 jours, et l'évolution de la distribution de l'humidité relative et de la température en profil ont été mesurée.

Dans les travaux de Qin et al. [76], une configuration expérimentale est présentée ci-dessous dans la Figure 28. Le principe de cet essai est de créer un gradient de température et d'humidité entre deux faces du matériau. Pour ce faire, il y a deux chambres, une sur le côté gauche dans laquelle se trouve la chambre climatique où la température et l'humidité relative ont été contrôlées par le système de climatisation. Une autre sur le côté droit où se trouve la chambre intérieure à une température et d'humidité fixes. L'air à l'intérieur de la chambre circule à un rythme constant par un ventilateur et conditionné par un radiateur électrique. L'humidité relative dans la chambre était contrôlée par la solution saline saturée. La mise en place expérimentale a été opérée en continu pendant 45 jours en fournissant des conditions contrôlées de température  $40 \pm 1$  °C et d'humidité relative  $82.32 \pm 0.25\%$  à la surface intérieure (droite) des spécimens de paroi et une température constante de  $20 \pm 1$  °C et relative humidité  $65 \pm 1.5\%$  aux surfaces extérieures (à gauche).

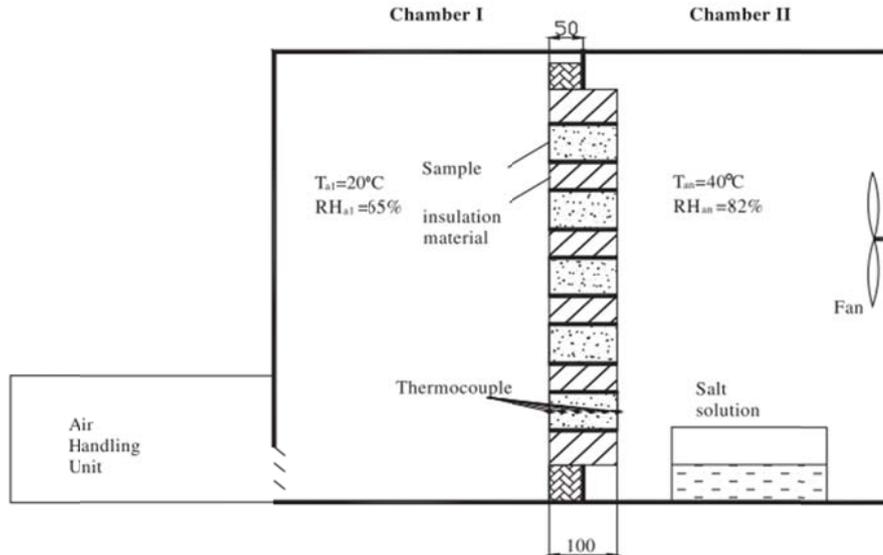


Figure III-27 : Schéma de la configuration expérimentale [76]

(Ferroukhi. M. Y, et al., 2016)[77] a aussi développé un dispositif expérimental constitué de deux compartiments contrôlés en terme d'humidité et de chaleur simulant le climat extérieur et l'ambiance de bâtiment. Le climat des deux compartiments est assuré par des générateurs de température et d'humidité. Les capteurs sont installés à différentes positions de deux compartiments et dans la paroi étudiée (cf. Figure III-29).

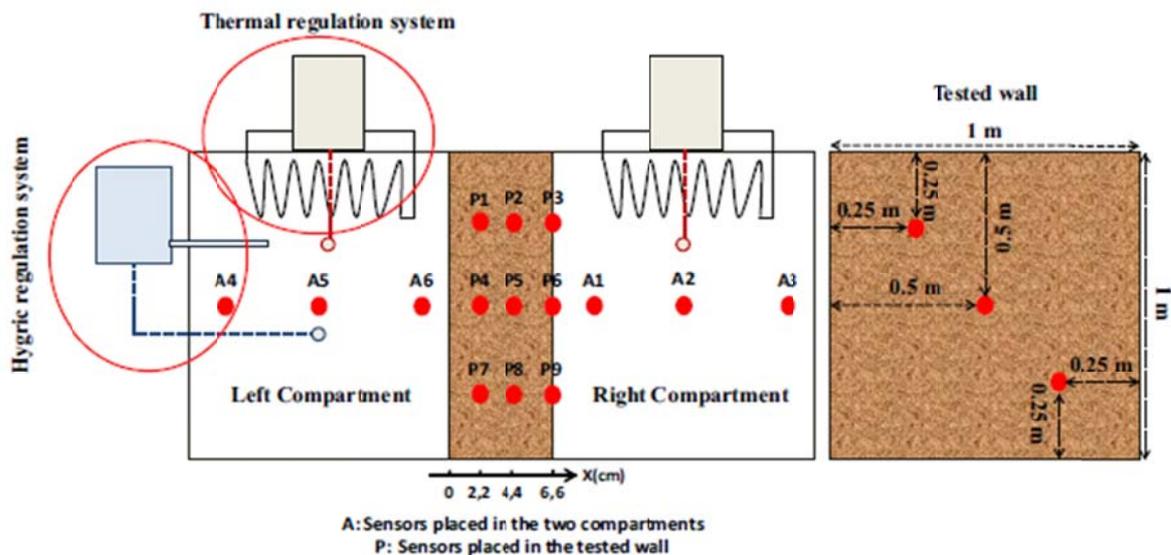


Figure III-28 : Banc expérimental développé par [77]

Rahim [78] ont développé un dispositif expérimental présenté dans un caisson climatique régulé en température et en humidité relative simulant l'environnement extérieur. Par ailleurs,

une de ses faces est fermée par la paroi étudiée (cf. Figure III-30). Des capteurs d'humidité et de température sont incorporés dans la paroi, permettant de suivre l'évolution de température et de l'humidité en profil. L'analyse du comportement hygrothermique d'un mur à l'échelle 1 soumis à des conditions environnementales statiques et dynamiques en température et en humidité est entreprise. La simulation numérique a montré la nécessité de prendre en compte l'hétérogénéité du matériau, l'influence de la température ainsi que le phénomène d'hystérésis sur les courbes de sorption sur le transfert de masse.

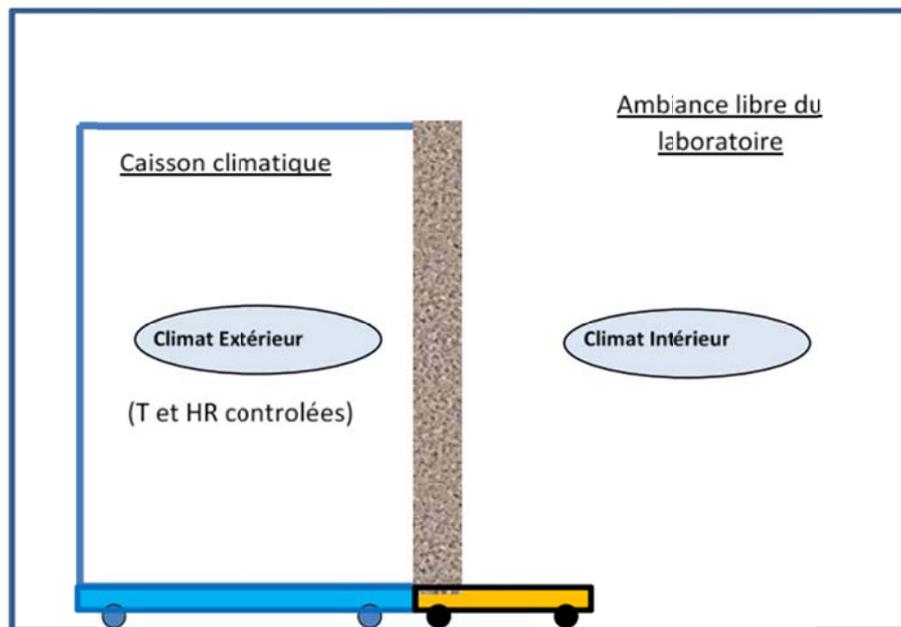


Figure III-29 : Banc expérimental développé par [78]

Slimani [79] avait aussi présenté un banc expérimental, disposant de deux compartiments contrôlés en humidité et en température (cf. Figure III-31). Une instrumentation riche est installée permettant la mesure des flux hydriques et thermiques, la mesure de la température et de l'humidité au profil de la paroi et dans les deux ambiances, la mesure de la vitesse de l'air ainsi que la différence de pression entre les deux ambiances. L'objectif de ce dispositif est d'étudier et d'analyser le comportement hygrothermique dans les parois de l'enveloppe de bâtiment, de valider des modèles HAM, ou encore de caractériser, à l'échelle de la paroi, les propriétés de transfert.

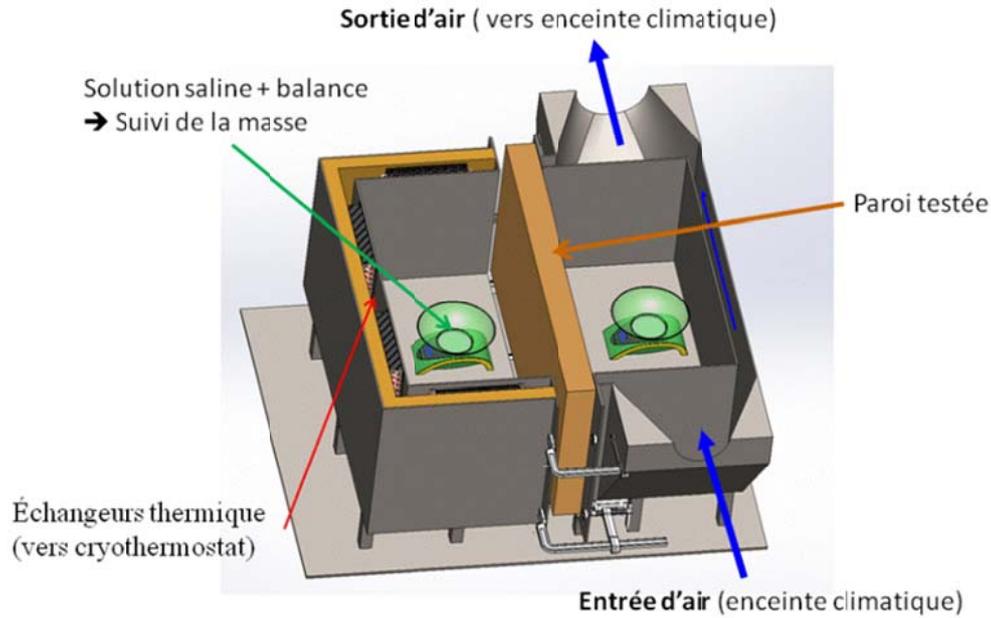


Figure III-30 : Banc expérimental développé par [79]

### III.8 Modélisation de la pluie et de l'ensoleillement

La pluie est rarement considérée dans la modélisation des transferts hygrothermique. Dans les travaux de [69], ils ont rajouté l'infiltration de la pluie par un flux d'eau liquide. De plus, dans les travaux de [80] ont aussi modélisé la pluie battante sur une paroi de bâtiment. Le bilan de masse sur la surface extérieure est constitué par la précipitation d'eau et à l'échange de vapeur. Les conditions aux limites utilisées sont de type flux. En effet, tant que la façade extérieure exposée n'atteint pas la saturation capillaire, l'échange d'humidité avec l'atmosphère  $g_{es}$ , y compris la pluie entraînée avec le vent  $R_{wdr}$  et la vapeur d'eau  $E_e$  [80].

$$g_{es} = R_{wdr} + E_e \quad [kg / m^2 s]$$

La pluie entraînée avec le vent peut être calculée la relation suivante [81] :

$$R_{wdr} = \alpha(R_h, U, \theta - \varphi) \cdot R_h \cdot U \quad [kg / m^2 s]$$

Tel que  $\alpha$  un coefficient d'interaction entre le vent, la pluie et la paroi ( $s/m$ ), dépendant de la vitesse du vent  $U$  ( $m/s$ ) et de sa direction par de la paroi par rapport au Nord  $\theta$  ( $^\circ$ ), la quantité de pluie horizontale ( $kg/m^2s$ ), et l'orientation de la paroi par rapport au Nord  $\varphi$  ( $^\circ$ ).

D'une façon générale, la caractérisation des matériaux de construction s'effectue suivant des recommandations se reportant à des normes à l'échelle du matériau. Ces propriétés, qui ont

également des paramètres d'entrées pour alimenter des modèles de simulation numériques, restent néanmoins insuffisantes pour prendre en compte son comportement hygrothermique d'une paroi à l'échelle 1 d'un bâtiment à cause de son hétérogénéité, et dans des conditions environnantes variables. Une validation expérimentale s'avère nécessaire à une échelle intermédiaire. En effet cela permettrait d'avoir des informations plus représentatives avec une meilleure maîtrise des conditions aux limites.

Le rayonnement est divisé en deux catégories : un rayonnement de courtes longueurs d'onde (rayonnement solaire) et un rayonnement de grandes longueurs d'onde. Le flux radiatif à la surface extérieure est donné par [81]

$$S_e = k(S_{dir} - S_{dif}) + \sigma \varepsilon \left[ F_{gro} (T_{gro}^4 - T_{es}^4) + F_{sky} (T_{sky}^4 - T_{es}^4) \right]$$

$k [-]$ : Le coefficient d'adsorption solaire.

$S_{dir,dif} [W/m^2]$ : Le rayonnement direct et diffus, obtenus à partir des données météo.

$\sigma [W/m^2K^4]$ : La constante de Boltzmann.

$\varepsilon [-]$ : L'émissivité du matériau.

$F_{gro,sky} [-]$ : Le facteur de forme.

$T_{gro} [K]$ : La température du sol, est égale à la température de l'air extérieure.

La température du ciel  $T_{sky} [K]$  a été proposée par plusieurs modèles dans la littérature, [82] comme suit :

$$T_{sky} = T_e - (23.8 - 0.2025(T_e - 273.15))(1 - 0.87cf)$$

Le flux radiatif est la somme de l'éclairement de courte longueur d'onde CLO absorbé et le rayonnement de grande longueur d'onde GLO échangé avec la surface, le ciel et les multiples parois et surface environnantes [83][84].

$$S_e = \sigma_f \left[ \varepsilon \sigma (T_{sky}^4 - T_{es}^4) + F_{sky} (T_g^4 - T_{es}^4) \right]$$

Tel que  $\sigma_f$  représente le coefficient d'absorptivité, et vaut  $1 - \varepsilon$

Actuellement, il y a peu de travaux traitants la modélisation expérimentale des transferts de masse et de chaleur prenant en compte les précipitations et les radiations solaire. L'intérêt de

prendre en compte ces paramètres est de qualifier les façades et prédire la durée de vie des constructions [85].

### **III.9 Conclusion**

Cette revue bibliographique nous a permis d'établir un état de l'art général quant aux transferts hygrothermiques dans les matériaux poreux de construction. Nous avons abordé lors de cette section trois parties qui semblent importantes pour une bonne prédiction du comportement hygrothermique des matériaux cimentaires. Tous d'abord, nous avons commencé par analyser les propriétés des éco-bétons.

À notre connaissance, les recherches basées sur ces derniers ont uniquement porté sur les propriétés mécaniques et la durabilité du béton dans lequel la poudre de verre et les additions minérales sont utilisées. Un manque de données quant aux propriétés thermiques et hydriques des éco-bétons à base de poudre de verre" a été constaté. En effet, les isothermes de sorption et de désorption, la perméabilité à la vapeur d'eau, la conductivité thermique, la chaleur spécifique et les facteurs de la microstructure les plus influents à savoir la porosité totale et la distribution porale et la composition chimique sont assez peu abordées dans la littérature. Il était aussi question de définir la microstructure des matériaux cimentaires ainsi que le phénomène d'hydratation par analyse thermogravimétrique ATG tout en cherchant à mettre en avant la relation microstructure-propriétés thermo-hydriques. Par la suite, nous avons passé en revue plusieurs bancs expérimentaux dédiés à la modélisation expérimentale des transferts hygrothermiques et à la validation des modèles de prédiction des transferts de masse et de chaleur HAM.

**Références bibliographies:**

- [1] A.P. Galvin, F. Agrela, J. Ayuso, M.G. Beltran, A. Barbudo, leaching assessment of concrete made of recycled coarse aggregate: physical and environmental characterisation of aggregates and hardened concrete, *Waste Manag.* 34 (2014) 1693–1704.
- [2] W.S. Fahmy, E.A.-L. Heneidy, E.E. Ali, I.S.M. Agwa, Mechanical properties of concrete containing recycled concrete aggregates subjected to different fire durations, *J. Eng. Sci. Assiut Univ.* 39 (2011) 1005–1019.
- [3] S.A. Santos, P.R. da Silva, J. de Brito, Mechanical performance evaluation of self-compacting concrete with fine and coarse recycled aggregates from the precast industry, *Materials (Basel)*. 10 (2017). <https://doi.org/10.3390/ma10080904>.
- [4] A. Gholampour, T. Ozbakkaloglu, Time-dependent and long-term mechanical properties of concretes incorporating different grades of coarse recycled concrete aggregates, *Eng. Struct.* 157 (2018) 224–234. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.12.015>.
- [5] K.H. Tan, H. Du, Use of waste glass as sand in mortar: Part i - Fresh, mechanical and durability properties, *Cem. Concr. Compos.* 35 (2013) 118–126. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.028>.
- [6] M. Adaway, Y. Wang, Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in structural concrete -Effects on compressive strength, *Electron. J. Struct. Eng.* 14 (2015) 116–122.
- [7] N.N. Gerges, C.A. Issa, S.A. Fawaz, J. Jabbour, J. Jreige, Recycled Glass Concrete : Coarse and Fine Aggregates, *EJERS, Eur. J. Eng. Res. Sci.* 3 (2018) 1–9. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.24018/ejers.2018.3.1.533>.
- [8] R. Idir, M. Cyr, A. Tagnit-Hamou, Use of fine glass as ASR inhibitor in glass aggregate mortars, *Constr. Build. Mater.* 24 (2010) 1309–1312. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.12.030>.
- [9] A. Zidol, A., Pavoine, A. and Tagnit-Hamou, Effect of Glass Powder on Concrete Permeability, *Int. Congr. Concr. Durability, Trondheim, Norw.* (2012) 15.
- [10] R. Idir, M. Cyr, A. Tagnit-Hamou, Pozzolanic properties of fine and coarse color-

- mixed glass cullet, *Cem. Concr. Compos.* 33 (2011) 19–29. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.09.013>.
- [11] N.A. Soliman, A. Tagnit-Hamou, Development of ultra-high-performance concrete using glass powder – Towards ecofriendly concrete, *Constr. Build. Mater.* 125 (2016) 600–612. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.073>.
- [12] A. Zidol, M.T. Tognonvi, A. Tagnit-Hamou, Effect of Glass Powder on Concrete Sustainability, *New J. Glas. Ceram.* 07 (2017) 34–47. <https://doi.org/10.4236/njgc.2017.72004>.
- [13] SOeS, Répartition des émissions mondiales par secteur d'activité en 2010, Chiffres Clés Du Clim. Fr. Monde Édition 2015. (n.d.). <https://www.edf.fr/media/display/33541>.
- [14] C. Meyer, N. Egosi, C. Andela, Concrete with waste glass as aggregate, *J. Chem. Inf. Model.* 53 (2011) 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.
- [15] S. Ahmad, M.I. Malik, M.B. Wani, R. Ahmad, Study of Concrete Involving Use of Waste Paper Sludge Ash as Partial Replacement of Cement, *IOSR J. Eng.* 3 (2013) 6–15.
- [16] S.E. and R. Hussain, Corrosion Resistance Performance of Fly Ash Blended Cement Concrete, *ACI Mater. J.* 91 (1994) 264–272.
- [17] M.H. Rahman, A Study on Potential of Recycled Glass as Cementitious Material in Concrete, Louisiana State University, 2015. <https://doi.org/DOI:10.13140/RG.2.1.2956.7602>.
- [18] C. Meyer, The greening of the concrete industry, *Cem. Concr. Compos.* 31 (2009) 601–605. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.12.010>.
- [19] World Business Council for Sustainable Development and International Energy Agency, WBCSD (World Business Council for Sustainable Development), IEA (International Energy Agency), 2009. <https://www.wbcsd.org/Sector-Projects/Cement-Sustainability-Initiative/News/Cement-technology-roadmap-shows-how-the-path-to-achieve-CO2-reductions-up-to-24-by-2050>.
- [20] T. Sellevold, E.. Bager, D.. Klitgaard, E. Jensen, T. Knudsen, Silica Fume Cement Paste—Hydration and Pore Structure. *Condensed Silica Fume in Concrete*, 1982.

- [21] P.K. Manmohan, D. and Metha, Influence of Pozzolanic, Slag and Chemical Admixtures on Pore Size Distribution and Permeability of Hardened Cement Pastes. *Cement Concrete and Aggregates*, 3 (1981) 63–67.
- [22] R.F. Feldman, Pore Structure Formation during Hydration of Fly Ash and Slag Cement Blends, *Mater. Res. Soc. Pittsburgh, PA.* (1981) 124–133. <https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/accepted/?id=c8c9e6df-44d5-4ce3-9949-3f83338fdfb2>.
- [23] R.A. Berenguer, A.P.B. Capraro, M.H.F. de Medeiros, A.M.P. Carneiro, R.A. De Oliveira, Sugar cane bagasse ash as a partial substitute of Portland cement: Effect on mechanical properties and emission of carbon dioxide, *J. Environ. Chem. Eng.* 8 (2020) 103655. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103655>.
- [24] D. Shen, Y. Jiao, J. Kang, Z. Feng, Y. Shen, Influence of ground granulated blast furnace slag on early-age cracking potential of internally cured high performance concrete, *Constr. Build. Mater.* 233 (2020) 117083. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117083>.
- [25] Z. Cheikh, B.B. Mohamed, Comparison between physical–mechanical properties of mortar made with Portland cement (CEMI) and slag cement (CEMIII) subjected to elevated temperature, *Case Stud. Constr. Mater.* (2020) e00339. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00339>.
- [26] Demirboğa R, Thermal conductivity and compressive strength of concrete incorporation with mineral admixtures, *Build. Environ.* 42 (2007) 2467–2471.
- [27] H.S. Gökçe, D. Hatungimana, K. Ramyar, Effect of fly ash and silica fume on hardened properties of foam concrete, 194 (2019) 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.036>.
- [28] D.P. Bentz, M.A. Peltz, Thermal properties of high-volume fly ash mortars and concretes, (2011). <https://doi.org/10.1177/1744259110376613>.
- [29] N. Issaadi, A. Nouviaire, R. Belarbi, A. Aït-Mokhtar, Moisture characterization of cementitious material properties: Assessment of water vapor sorption isotherm and permeability variation with ages, *Constr. Build. Mater.* 83 (2015) 237–247. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.030>.

- [30] A. Shayan, A. Xu, Value-added utilisation of waste glass in concrete, *Cem. Concr. Res.* 34 (2004) 81–89. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00251-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00251-5).
- [31] Y. Shao, T. Lefort, S. Moras, D. Rodriguez, Studies on concrete containing ground waste glass, *Cem. Concr. Res.* 30 (2000) 91–100. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00213-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00213-6).
- [32] A. Zidol, Optimisation de la finesse de la poudre de verre dans les systèmes cimentaires binaires. Master's Thesis, University of Sherbrooke, Canada, 2009.
- [33] B. Taha, G. Nounu, Properties of concrete contains mixed colour waste recycled glass as sand and cement replacement, *Constr. Build. Mater.* 22 (2008) 713–720. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.01.019>.
- [34] R. Idir, M. Cyr, A. Tagnit-Hamou, Use of fine glass as ASR inhibitor in glass aggregate mortars, *Constr. Build. Mater.* 24 (2010) 1309–1312. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.12.030>.
- [35] A. Shayan, A. Xu, Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs, *Cem. Concr. Res.* 36 (2006) 457–468. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.12.012>.
- [36] A.V. OllivierJ.-P, *La durabilité des bétons*, 2<sup>ème</sup> édition, 2008.
- [37] F. Bennai, K. Abahri, R. Belarbi, A. Tahakourt, Convective and Conductive Thermal Homogenization for Nonsturated Porous Building Materials: Application on the Thermal Conductivity Tensor ., (2016) 1–13.
- [38] N. Issaadi, Effets de la variabilité des propriétés de matériaux cimentaires sur les transferts hygrothermiques : développement d ' une approche probabiliste, Thèse de doctorat, Université de La Rochelle, 2015.
- [39] M. Rahim, hygrothermique de parois agro- sourcées à l'échelle 1: expérimentation et modélisation, Thèse de Doctorat, Université de Picardie Jules Verne, 2015.
- [40] B. Laidoudi, A. Crigny, S. Amony, et B. Dupre, Blocs de construction en béton de lin : Caractérisations mécaniques, thermiques et hygroscopiques, *Écobat Sci. Tech.* 1 Ère Ed. ; Paris-2012. (2012).
- [41] M.Y. Ferroukhi, Modélisation des transferts thermo-hydro-aérauliques dans les

- enveloppes de bâtiments : Evaluation des désordres causés par l'humidité, université de La Rochelle, 2015.
- [42] ASTM D4404–84, Standard Test Method for Determination of Pore Volume and Pore Volume Distribution of Soil and Rock by Mercury Intrusion Porosimetry, 1998.
- [43] J.-F. Daïan, *Processus de condensation et de transfert d'eau dans un matériau méso et macroporeux. Etude expérimentale du mortier de ciment*. Ph.D. thesis., Université scientifique, technologique et médicale & Institut national polytechnique de Grenoble, 1986.
- [44] S. Brunauer, P.H. Emmett, E. Teller, Adsorption of Gases in Multimolecular Layers, *J. Am. Chem. Soc.* 60 (1938) 309–319. <https://doi.org/10.1021/ja01269a023>.
- [45] J.-F. Daïan, *Équilibre et transferts en milieux poreux, Première partie*. Université Joseph Fourier. pp. 642., 2013.
- [46] A.D. McNaught, A. Wilkinson, “Adsorption” IUPAC. *Compendium of Chemical Terminology*, 2nd ed. (the “Gold Book”), Blackwell Sci. Publ. Oxford. (1997). <https://doi.org/10.1351/goldbook.A00155>.
- [47] Azos Diaz K., *Étude multi-échelle des transferts de chaleur et de masse appliquée à un bâtiment parisien rénové, en condition météorologique normale et en période de vague de chaleur*, Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie - Paris 6, 2016.
- [48] S. Brunauer, L.S. Deming, W.S. Deming, E. Teller, on a theory of the van der Waals adsorption of gases, *J. Am. Chem. Soc.* 62 (1940) 1723–1732.
- [49] ISO 12571, *Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment, Détermination des propriétés de sorption hygroscopique*, 2000.
- [50] A. Anderberg, L. Wadso, Method for simultaneous determination of sorption isotherms and diffusivity of cement-based materials, *Cem. Concr. Res.* 38 (2008) 89–94.
- [51] K. Abahri, *Modélisation des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité dans les matériaux poreux de construction*, Université de La Rochelle, 2012.
- [52] D.. Duong, *Adsorption analysis : Equilibria and kinetics*, Chem. Eng. Imp. Coll. Press. 2 (1998).
- [53] S. Furmaniak, A.P. Terzyk, P.A. Gauden, *The general mechanism of water sorption on*

- foodstuffs - importance of the multitemperature fitting of data and the hierarchy of models, *J. Food Eng.* (2007) 528–535.
- [54] Langmuir, The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum, *J. American Chem. Soc.* 40 (1918) 1361.
- [55] S. Furmaniak, A.P. Terzyk, P.A. Gauden, G. Rychlicki, Applicability of the generalised d'arcy and watt model to description of water sorption on pineapple and other foodstuffs, *J. Food Eng.* (2007) 718–723.
- [56] P.B. Staudt, I.C. Tessaro, L.D.F. Marczak, R. d. P. Soares, N.S.M. Cardozo, A new method for predicting sorption isotherms at different temperatures: Extension to the GAB model, *A New Method Predict. Sorption Isotherms Differ. Temp. Ext. to GAB Model.* 118 (2013) 247–255.
- [57] Dullien F., *Porous Media Fluid Transport and Pore Structure*, New York, Acad. Press. (1997).
- [58] J. Brakel (Van), P. Heerthes, Analysis of diffusion in macroporous media in terms of a porosity, a tortuosity and a constrictivity factor, *J. Heat Mass Transf.* 17 (1974) 1093–1103.
- [59] Trechsel H.R., *Moisture Analysis and Condensation Control in Building Envelopes*, ASTM Int. (2001).
- [60] Talukdar P., S.O. Olutmayin, O.F. Osanyintola, C.J. Simonson, An experimental data set for benchmarking 1-D, transient heat and moisture transfer models of hygroscopic building materials. Part I: Experimental facility and material property data, *Int. J. Heat Mass Transf.* 50 (2007) 4527–4539.
- [61] Galbraith G.H., R.C. Mclean, J.S. Guo, Moisture permeability data presented as a mathematical relationship, *Build. Res. Inf.* 26 (1998) 157–168. <https://doi.org/10.1080/096132198369931>.
- [62] Galbraith G.H., J.S. Guo, R.C. McLean, The effect of temperature on the moisture permeability of building materials, *Build. Res. Inf.* 28 (2000) 245–259. <https://doi.org/doi:10.1080/09613210050073706>.
- [63] ISO 12572, *Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment, Détermination des propriétés de transmission de la vapeur d'eau*, 2001.

- [64] A. Fick, 'Über diffusion', *Ann. Der Phys. Und Chemie.* (1855).
- [65] M. Qin, Etude des phénomènes de transfert hygrothermique dans les arois de batiments, Thèse de Doctorat de l'Université de La Rochelle, 2007.
- [66] A. Trabelsi, Études Numérique Et Expérimentale Des Transferts Hygrothermiques Dans Les Matériaux Poreux De Construction, Thèse de Doctorat de l'Université de La Rochelle, 2010.
- [67] M.Y. Ferroukhi, R. Belarbi, K. Limam, Effect of Hygrothermal Transfer on Multilayer Walls Behavior, Assessment of Condensation Risk, *Adv. Mater. Res.* 1051 (2014) 647–655. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1051.647>.
- [68] J.R. Vries, D. De Philip, Moisture movement in porous material under temperature gradients, *Trans. Am. Geophys. Union.* 38 (1957) 222–232.
- [69] H.M. Künzle, Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components One and two dimensional calculation using simple parameter, Fraunhofer IRB Verlag. (1995).
- [70] T. Duforestel, Bases métrologiques et modèles pour la simulation du comportement Hygrothermiques des composants et ouvrages du bâtiment,» Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1992.
- [71] C.E. Hagentoft, A.S. Kalagasidis, B. Adl-Zarrabi, S. Roels, J. Carmeliet, H. Hens, J. Grunewald, M. Funk, R. Becker, D. Shamir, O. Adan, Assessment method of numerical prediction models for combined heat, air and moisture transfer in building components: Benchmarks for one-dimensional cases, *J. Therm. Envel. Build.* 27 (2004) 327–352.
- [72] A. V. Luikov, Heat and mass transfer in capillary-porous bodies, Pergamon Press. Oxford 1<sup>ère</sup> Édn. (1966).
- [73] M. Qin, R. Belarbi, Development of an analytical method for simultaneous heat and moisture transfer in building materials utilizing transfer function method, *J. Mater. Civ. Eng.* 17 (2005) 492–497. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2005\)17:5\(492\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2005)17:5(492)).
- [74] M. Qin, R. Belarbi, A. Aït-Mokhtar, L.-O. Nilsson, Simultaneous heat and moisture transport in porous building materials: evaluation of nonisothermal moisture transport properties, *J. Mater. Sci.* 43 (2008) 3655–3663. <https://doi.org/10.1007/s10853-008->

2584-3.

- [75] B. Remki, K. Abahri, M. Tahlaiti, R. Belarbi, Hygrothermal transfer in wood drying under the atmospheric pressure gradient, *Int. J. Therm. Sci.* 57 (2012) 135–141.
- [76] M. Qin, A. Aït-Mokhtar, R. Belarbi, Two-dimensional hygrothermal transfer in porous building materials, *Appl. Therm. Eng.* 30 (2010) 2555–2562. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.07.006>.
- [77] M.Y. Ferroukhi, K. Abahri, R. Belarbi, K. Limam, A. Nouviaire, Experimental validation of coupled heat, air and moisture transfer modeling in multilayer building components, *Heat Mass Transf. Und Stoffuebertragung.* 52 (2016) 2257–2269. <https://doi.org/10.1007/s00231-015-1740-y>.
- [78] M. Rahim, O. Douzane, A.D. Tran Le, G. Promis, T. Langlet, Experimental investigation of hygrothermal behavior of two bio-based building envelopes, *Energy Build.* 139 (2017) 608–615. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.058>.
- [79] Z. Slimani, Analyse expérimentale et numérique du comportement hygrothermique de parois fortement hygroscopiques, Thèse de doctorat, Université Claude Bernard Lyon 1, 2015.
- [80] H. Janssen, Wind-driven rain as a boundary condition for HAM simulations: Analysis of simplified modelling approaches, *Build. Environ.* 42 (2007) 1555–1567. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.001>.
- [81] H. Janssen, Conservative modelling of the moisture and heat transfer in building components under atmospheric excitation, *Int. J. Heat Mass Transf.* 50 (2007) 1128–1140. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.06.048>.
- [82] H. Janssen, THE INFLUENCE OF SOIL MOISTURE TRANSFER ON BUILDING HEAT LOSS VIA THE GROUND, 2002.
- [83] R. Djedjig, E. Bozonnet, R. Belarbi, Modeling green wall interactions with street canyons for building energy simulation in urban context, *Urban Clim.* 16 (2016) 75–85. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.12.003>.
- [84] R. Djedjig, Impacts des enveloppes végétales à l'interface bâtiment microclimat urbain To cite this version : HAL Id : tel-01141046 Impacts des enveloppes végétales à l'interface bâtiment microclimat urbain, (2015).

- [85] M. Nascimento, J. Gonçalves Pereira, G. Alves Lira, V.D.S.F. Dantas, André A. Nobrega, Hygrothermal simulation : Use for service life prediction and maintenance of façade, *Eco-Architecture*. 183 (2019) 139–149. <https://doi.org/doi:10.2495/ARC180131>.
- [86] L.A. De Mello, L.M. Moura, N. Mendes, International Journal of Thermal Sciences A model for predicting heat , air and moisture transfer through fibrous materials, *Int. J. Therm. Sci.* 145 (2019) 106036. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.106036>.

**CHAPITRE IV : CARACTERISATION  
MECANIQUE, THERMIQUE, HYDRIQUE ET  
MICROSTRUCTURALE DES ECO BETONS A  
BASE DE POUDRES DE VERRE ET DE LA  
FUMEE DE SILICE**



## **IV.1 Introduction**

Dans le but de mettre en évidence le lien entre la composition des matériaux cimentaires et les principaux paramètres de transferts hygrothermiques et les indicateurs de leur durabilité. Il a été mis au point un programme expérimental permettant de caractériser finement ces matériaux, suivant la démarche scientifique illustrée dans la Figure IV- 1. Le choix s'est porté sur les paramètres de transferts hygrothermiques les plus influents ; la perméabilité à la vapeur d'eau, les courbes d'isotherme de sorption la conductivité thermique, la chaleur massique. Par ailleurs, une évaluation des paramètres caractérisant la microstructure a été entreprise. Il s'agit de la porosité, la distribution de la taille des pores et l'analyse thermogravimétrique qui sont considérées comme indicateurs de la durabilité.

Une attention particulière a été prise quant à l'influence de la substitution du ciment par la poudre de verre, qui est un déchet inerte non-biodégradable et occupant des grandes surfaces, sur les paramètres de transferts de chaleur et de masse. De plus, il est important de rappeler que la substitution du ciment permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre, grâce à la diminution de taux de clinker dans le béton, principal source d'émission mondiale de CO<sub>2</sub>.

À cette fin, des bétons à base des ciments CEMI et CEMV, de la poudre de verre (GP) et de la fumée de silice (SF) ont été confectionnés au laboratoire. Plusieurs valeurs de taux de remplacement du ciment par de la GP et de la SF ont été utilisées. Les propriétés mécaniques, thermiques et hydriques de ces "éco-bétons" ont été comparées à celle du béton témoin constitué d'un ciment CEMI, pris comme matériau de référence.

Il a été effectué, dans un premier temps, une caractérisation des constituants du liant. Ainsi, il a été recouru à l'analyse granulométrique, à l'imagerie basée sur la microscopie électronique à balayage (MEB) des poudres utilisées. Il s'est agi aussi, entre autre d'une caractérisation microstructurale des bétons choisis où moyennant la mesure de la porosité à l'eau, la distribution porale basée sur la méthode d'intrusion au mercure, le MEB et les analyses de thermogravimétrie (ATG). Afin de pallier au manque de données concernant le comportement des bétons issus de la valorisation des déchets de verre, une caractérisation mécanique et hygrothermique de ces éco-matériaux utilisés a été réalisée. Cette investigation expérimentale couvre l'étude de la résistance mécanique, de la conductivité thermique, de la chaleur spécifique, de la perméabilité à la vapeur et des isothermes de sorption.

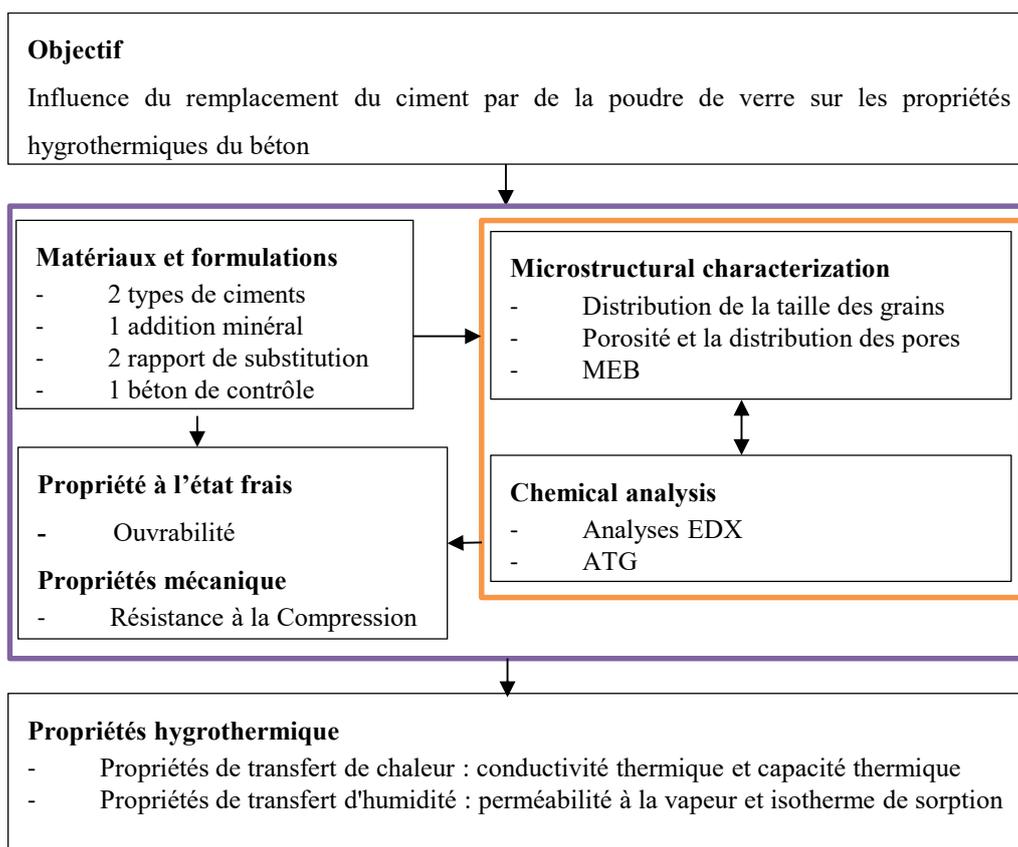


Figure IV- 1: Démarche entreprise

Ce chapitre sera consacré, dans un premier temps, à la formulation et la composition des matériaux étudiés ainsi que le mode de conditionnement de ces derniers pour les préparer aux différents essais. Il sera présenté, ensuite, les différentes techniques et protocoles expérimentaux lors de cette phase de caractérisation des principales propriétés des éco-bétons élaborés. Enfin, une analyse des résultats de cette caractérisation des propriétés des éco-bétons étudiés sera entreprise.

## IV.2 Programme expérimental

### IV.2.1 Présentation des matériaux étudiés

Dans la partie de caractérisation, deux types de ciment ont été utilisés : CEMI 52,5 N et CEMV 32,5 N selon la norme européenne EN 197-1 [1]. Le CEMV contient une forte teneur en laitier (19%) et en cendres volantes (19%) ainsi que 62% de clinker. Cette typologie de ciment a été utilisée afin de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> en raison de son faible taux de clinker. De plus, la fumée de silice et la poudre de verre ont été utilisées comme substituts de masse du CEMI. La poudre de verre a été récupérée à partir de déchets de verre de différentes couleurs. Ces derniers ont été fournis par la déchèterie de l'agglomération de La Rochelle

(France). Les déchets de verre ont été nettoyés, triés et broyés jusqu'à obtenir une poudre très fine avec un diamètre maximal  $d_{\max}$  de 50  $\mu\text{m}$  comme est indiqué dans le Tableau IV- 1.

Tableau IV- 1:  $d_{\max}$ , densité et surface spécifique des ciments, fumée de silice et de la poudre de verre

|  | CEMI 52.5 N | CEMV 32.5 N | Fumée de silice (SF) | Poudre de verre (GP) |
|--|-------------|-------------|----------------------|----------------------|
| $d_{10}$ ( $\mu\text{m}$ )                       | 3.2         | 50          | 2                    | 11                   |
| $d_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )                       | 12          | 80          | 8.5                  | 19                   |
| $d_{90}$ ( $\mu\text{m}$ )                       | 28          | 200         | 18                   | 34                   |
| $d_{\max}$ ( $\mu\text{m}$ )                     | 60          | 470         | 36                   | 50                   |
| Densité (-)                                      | 3.17        | 2.56        | 2.18                 | 2.71                 |
| Surface spécifique BET ( $\text{m}^2/\text{g}$ ) | 6.43        | 2.06        | 22.07                | 8.76                 |

L'analyse granulométrique de chaque liant utilisé a été réalisée par la voie sèche à l'aide du dispositif CILAS 1090 particle-size-analyser® conforme à la norme ISO 13320-1[2] qui permet de détecter la taille des particules de 0,1  $\mu\text{m}$  à 2 mm. Les résultats sont présentés sur la Figure IV-2. Les diamètres  $d_{10}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{90}$  et  $d_{\max}$ , la surface spécifique BET analysée par le dispositif Triflex Micromeritics® selon la norme NF EN ISO 18757 [3] et la densité mesurée par Pycnomètre à hélium selon la norme NF EN ISO 1097-7[4] des poudres utilisées, sont illustrés dans le Tableau IV- 1. En outre, du sable (0/4 mm) et du gravier (4/12,5 mm) ont été utilisés. La fumée de silice (SF), conçue avec une densité de 2,18 et une taille maximale de particules ( $d_{\max}$ ) de 36  $\mu\text{m}$ , a été utilisée comme matériau de remplissage. La poudre de verre (GP) présente une densité de 2,71 et un  $d_{50}$  de 19  $\mu\text{m}$ . Il convient de rappeler que plus les particules de poudre de verre sont fines (< 70 $\mu\text{m}$ ) plus la GP peut développer une activité pouzzolanique et réduire la réaction alcali-silice (RAS) [5–8]. Par ailleurs, les tailles des particules des liants en l'occurrence la poudre de verre, la fumée de silice ainsi que les ciments CEMI composé à 95 % de clinker et CEMV riche en laitier et en cendres volantes, ont été comparées afin d'évaluer leurs finesses comme le montre la Figure IV- 2. En effet,

cette dernière met en exergue l'impact du laitier et des cendres volantes sur la distribution de la taille des particules du ciment [9].

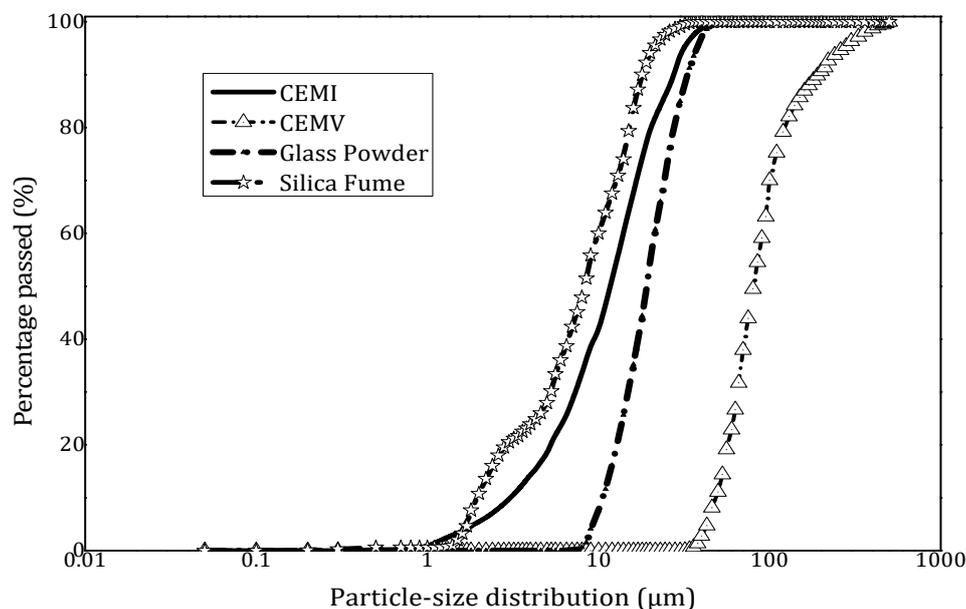


Figure IV- 2: Analyse granulométrique des liants utilisés

Les images MEB de la Figure IV- 3 montrent la morphologie des poudres : CEMI, CEMV, poudre de verre et fumée de silice et leurs tailles de particules. De toute évidence, le CEMI et le SF sont constitués de particules de poudre de tailles et de phases multiples ; de forme irrégulière pour le CEMI contrairement à la poudre de SF. En effet, la taille des particules varie de 1  $\mu\text{m}$  à 60  $\mu\text{m}$  pour les poudres CEMI et SF, et de 30  $\mu\text{m}$  à 500  $\mu\text{m}$  pour les poudres CEMV. Les GP ont des particules de tailles multiples et de formes irrégulières, allant de 8  $\mu\text{m}$  à 50  $\mu\text{m}$  comme indiqué dans le Tableau IV- 1. L'analyse élémentaire des liants, réalisée par micro-analyse aux rayons X à dispersion d'énergie (EDX) couplée au MEB, est présentée dans le Tableau IV- 2. Elle permet d'identifier et de quantifier les éléments chimiques des matériaux utilisés. Les résultats montrent que la GP et la SF sont riches en silice. Cette dernière est responsable de la réaction pouzzolanique des deux liants et de la formation de plus de C-S-H au détriment de la portlandite [10,11]. Le CEMV, quant à lui, contient de l'aluminate et du calcium qui participent à l'amélioration de la durabilité du matériau.

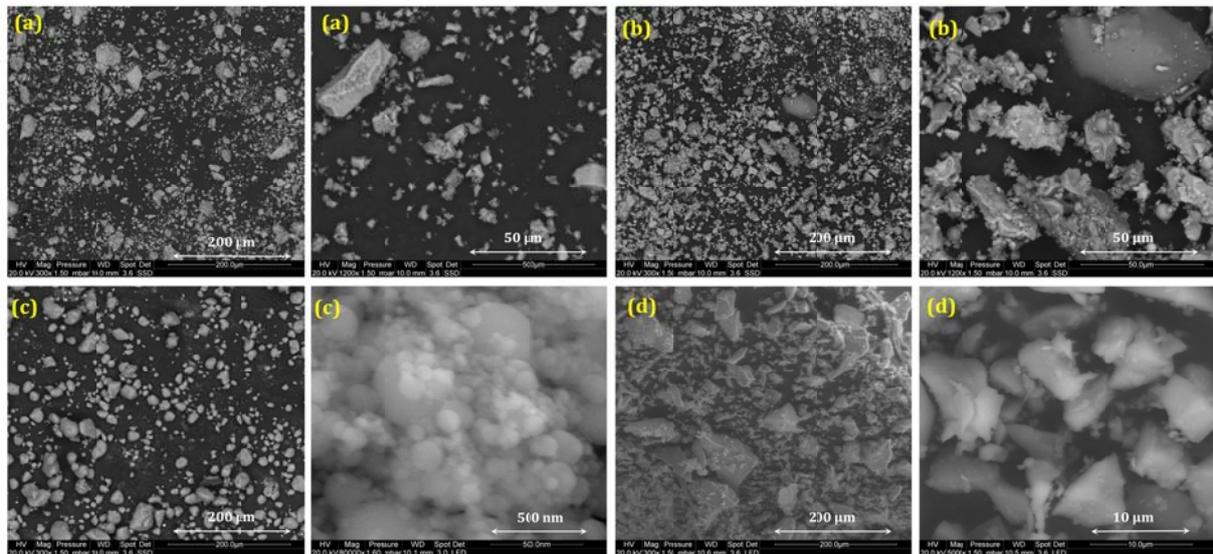


Figure IV- 3: Images MEB de la CEMI (a), de la CEMV (b), de la fumée de silice (c) et de la poudre de verre (d).

Tableau IV- 2: Composition élémentaire des liants utilisés (% wt).

|                 | C     | O     | Na   | Mg   | Al   | Si    | S    | K    | Ca    | Fe   |
|-----------------|-------|-------|------|------|------|-------|------|------|-------|------|
| CEMI            | 47,06 | 20,55 | 0    | 0,31 | 3,06 | 5,01  | 0,4  | 0,41 | 22,42 | 0,78 |
| CEMV            | 28,26 | 37,85 | 0,13 | 0,89 | 8,34 | 12,88 | 0,25 | 0,27 | 9,45  | 1,68 |
| Fumée de silice | 32,74 | 43,92 | 0    | 0    | 1    | 22,34 | 0    | 0    | 0     | 0    |
| Poudre de verre | 8,67  | 43,36 | 7,7  | 1,19 | 4,17 | 28,83 | 0    | 0,53 | 5,55  | 0    |

#### IV.2.2 Formulations des bétons avec un remplacement ciment / poudre de verre

Pour cette étude, sept mélanges de bétons ont été proposés comme indiqué dans le Tableau IV- 3. Tous les mélanges ont un rapport eau/liant (E/L) de 0,45, avec 350 kg/m<sup>3</sup> de liant. Un béton témoin à base de CEMI uniquement a été fabriqué (appelé PC- I). Quatre autres bétons contenant de la poudre de verre (G) et des fumées de silice (SF), en remplacement partiel du CEM I, ont été confectionnés :(i) 20% de poudre de verre (appelé 20 G-I) ; (ii) 30% de poudre de verre (appelé 30G-I) ; (iii) 20% de poudre de verre + 5% de fumée de silice (appelé 20GSF-I) et (iv) 30% de poudre de verre + 5% de fumée de silice (appelé 30 GSF-I). De plus,

, deux bétons à base CEMV et poudre de verre ont été élaborés : 20 % de poudre de verre (appelé 20G-V) et 30 de poudre de verre (appelé 30G-V). Un superplastifiant SikaCem® a été ajouté à tous les mélanges de 2 l/m<sup>3</sup> de béton dans le but d'avoir une maniabilité adéquate et un affaissement de classe plastique à très plastique pour le béton de référence (PC-I).

Tableau IV- 3: Mélanges des bétons étudiés (kg/m<sup>3</sup>)

| Formulations        | PC-I (CEMI) | 20G-I (CEMI) | 30G-I (CEMI) | 20GSF-I (CEMI) | 30GSF-I (CEMI) | 20G-V (CEMV) | 30G-V (CEMV) |
|---------------------|-------------|--------------|--------------|----------------|----------------|--------------|--------------|
| Sable 0/3.15        | 639         | 639          | 639          | 639            | 639            | 639          | 639          |
| Gravier 3.15/12.5   | 1070        | 1070         | 1070         | 1070           | 1070           | 1070         | 1070         |
| Ciment              | 350         | 280          | 245          | 262.5          | 227.5          | 280          | 245          |
| Poudre de verre     | 0           | 70           | 105          | 70             | 105            | 70           | 105          |
| Fumée de silice     | 0           | 0            | 0            | 17.5           | 17.5           | 0            | 0            |
| Eau                 | 157.5       | 157.5        | 157.5        | 157.5          | 157.5          | 157.5        | 157.5        |
| E/L                 | 0.45        | 0.45         | 0.45         | 0.45           | 0.45           | 0.45         | 0.45         |
| Taux de Clinker (%) | 95          | 76           | 66.5         | 71.25          | 61.75          | 49.6         | 43           |

## IV.2.3 Protocoles utilisés lors de la caractérisation expérimentale

### IV.2.3.1 Propriétés du béton à l'état frais (Essai de l'ouvrabilité)

L'essai d'affaissement au cône d'Abrams est le plus couramment employé pour déterminer l'ouvrabilité et la maniabilité du béton frais (cf. Figure IV-4). Cet essai est effectué conformément aux recommandations de la norme NF EN 12350-2 [12]. Dans cet essai, l'ouvrabilité est caractérisée par l'affaissement que connaît un cône de béton soumis à son propre poids. La norme NF EN 206 [13] définit cinq classes de consistance définies en fonction de l'affaissement mesuré : ferme, plastique, très plastique, fluide et très fluide.

Le béton est introduit dans le moule tronconique métallique sans fond de 300 mm de haut, 200 mm de diamètre en sa partie inférieure et de 100 mm en sa partie supérieure. Le cône posé sur une plaque d'appui rigide et plate est rempli de trois couches de béton frais et chaque couche est piquée 25 coups. Après avoir arasé le bord supérieur du moule, celui-ci est retiré en 3 secondes par une remontée verticale et régulière, puis l'on mesure, aussitôt après, l'affaissement.



Figure IV- 4: Essai de l'ouvrabilité (Essai de cône d'Abrams)

#### IV.2.3.2 Résistance à la compression

La résistance à la compression à 28 jours sera mesurée sur des éprouvettes cylindriques (11x22 cm<sup>3</sup>) selon la norme européenne EN 12390-2 [14]. Ces éprouvettes ont été entreposés après le démoulage à 24 h dans une chambre humide de 50% d'hygrométrie et à une température de 22 °C. Cette condition de cure est largement utilisée dans la littérature [15] du fait qu'elle simule mieux la réalité qu'une cure par immersion totale dans l'eau. Elle permet, aussi, d'éviter la lixiviation du matériau dans l'eau.

#### IV.2.3.3 Porosité accessible à l'eau

La mesure sera effectuée selon les recommandations de l'AFPC-AFREM [16] sur des éprouvettes cylindriques (5 cm de diamètre, 2 cm de hauteur) selon 4 étapes distinctes qui seront décrits ci-après :

- La première correspond à une phase de dégazage de l'échantillon au moyen du banc de saturation présenté dans la Figure IV- 5. La mise sous vide est réalisée au moyen d'une pompe à vide capable de maintenir un vide absolu à l'intérieur du dessiccateur (pression proche de 2mm Hg) pendant 4 heures. Puis, le récipient sera rempli d'eau afin de saturer les échantillons tout en poursuivant le pompage pendant 24h pour maintenir l'enceinte à la vapeur d'eau saturante. Par la suite, l'ensemble est mis à pression atmosphérique pendant 24 heures.
- La Phase 2 consiste à peser une première fois dans l'eau à l'aide d'une balance hydrostatique, la masse de l'échantillon immergé *Meau*.
- Lors de la phase 3, une pesée à l'air de l'échantillon extrait de l'eau et légèrement essuyé pour obtenir la masse de l'échantillon saturé notée *Mair*.

- La phase 4 est dédiée à un séchage. L'échantillon est mis dans une étuve à une température de 105 °C. Pendant le séchage, on procède à un suivi de perte de masse jusqu'à équilibre selon le critère  $\frac{\Delta m_{24h}}{m} \leq 0,1 \%$  où  $\Delta m_{24h}$  [kg] est la perte de masse entre deux pesées effectuées à 24 heures d'intervalle, et  $m$  sa masse à la première borne de l'intervalle. Après équilibre, on obtient alors la masse sèche de l'échantillon  $M_{sec}$  [kg].

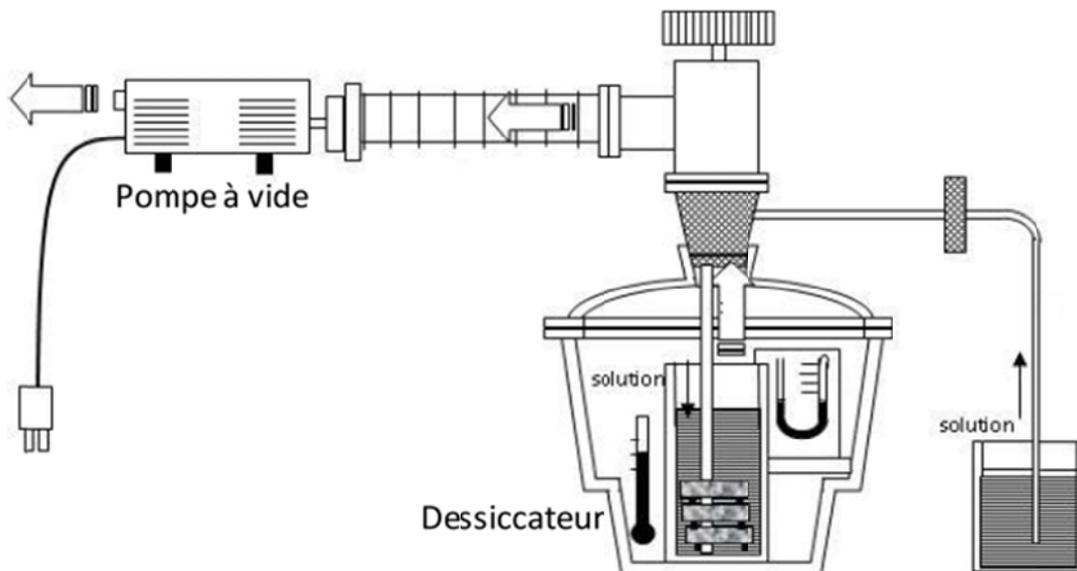


Figure IV- 5: Banc de saturation [17]

La porosité peut être déterminée comme suit :

$$\varepsilon = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \times 100 \quad (\%)$$

#### IV.2.3.4 Porosité par intrusion au mercure

La porosimétrie au mercure permet de connaître la structure et la distribution de la taille des pores ainsi que la tortuosité d'un matériau. Elle permet également d'estimer le diamètre critique des pores par une méthode basée sur le principe physique d'un liquide non mouillant pénétrant un échantillon sous une pression appliquée. L'essai consiste à sécher, préalablement les échantillons cubiques d'environ  $2\text{cm}^3$  obtenue par sciage dans une étuve sous vide à 45°C jusqu'à stabilisation de leurs masses. Ensuite, l'échantillon est placé dans la chambre basse pression afin de s'assurer de l'évacuation totale des pores. L'échantillon est, dès lors, placé dans la chambre haute pression où une introduction progressive du mercure (liquide non

mouillant) sous pression dans la structure poreuse est réalisée. Puis le mercure est injecté dans les échantillons par paliers de pression jusqu'à l'équilibre. Ainsi, pour chaque palier de pression correspond un volume injecté, il sera déduit de ces mesures les informations utiles, notamment, le rayon des pores correspondant à chaque palier de pression et donc à la distribution de la taille des pores (supposés cylindriques) obtenue à l'aide de l'équation de Washburn donnée par la relation suivante:

$$r_p = -\frac{2\sigma_{Hg} \cos \theta}{P_{Hg}}$$

Où  $r_p$ [m] est le diamètre des pores;

$P_{Hg}$  [Pa] la pression exercée sur le mercure ;

$\sigma_{Hg}$ [N/m] la tension superficielle de mercure ( $\sigma_{Hg} = 0.480 \text{ N.m}^{-1}$  est la valeur couramment utilisée),

$\theta$ : l'angle de contact entre la surface solide et le mercure ( $\theta = 130^\circ$  souvent recommandé pour des températures entre 20 à 25°C).

Le principal résultat de cette méthode est la distribution des pores et cela à partir d'une courbe caractéristique de l'essai  $dV/d\log D = f(r_p)$ . Elle traduit le volume de mercure injecté pour chaque rayon capillaire.

Nous allons utiliser le prosimètre à mercure Micrometrics® -Autopore V 9600, conformément à la norme ASTM D4404-84 (1998) [18].

#### **IV.2.3.5 Analyse de la microstructure par Microscope Electronique à Balayage (MEB)**

L'imagerie par Microscope Electronique à Balayage MEB a été réalisée en utilisant un microscope environnemental FEI Quanta 200 ESEM FEG, équipé d'un émetteur d'électrons FEG à effet de champ GUN, et d'un détecteur à grand champ (LFD) d'électrons secondaires (SE). L'appareil fonctionnait à 20kV et 1,5 mbar de pression de vapeur d'eau. L'avantage de cette technique est qu'aucune préparation de l'échantillon n'est nécessaire avant le test, ce qui permet de ne pas affecter sa morphologie et le préserver ainsi des dommages [19,20].

#### **IV.2.3.6 Analyse thermogravimétrique ATG**

La thermogravimétrie est une technique expérimentale qui consiste à mesurer la variation de masse d'un échantillon en fonction de la température. Dans notre cas, cette technique a été utilisée pour surveiller les formations de la phase solide des éco-bétons et l'éventuelle réaction pouzzolanique ( $\text{Ca(OH)}_2$ , calcite, etc.). L'appareil utilisé est un SETARAM® de type

SETSYS Evolution 16/18. Il se compose d'une chambre étanche pour contrôler l'atmosphère de l'échantillon, d'un four pour gérer la température, d'un module de pesage (microbalance), d'un thermocouple pour mesurer la température, et d'un ordinateur pour contrôler et enregistrer les données comme montré dans la Figure IV- 6. Pendant l'essai, la température doit être relevée d'une température initiale correspondante à celle de l'ambiance à une température de 1000°C avec une vitesse constante de 10°C/min. Cette procédure est largement utilisée dans la littérature et recommandée par [16,21].

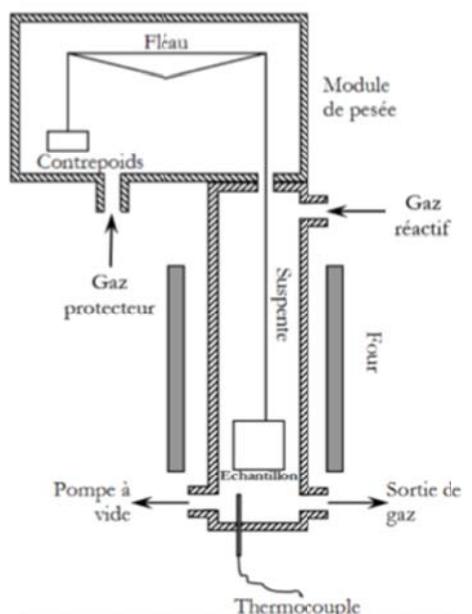


Figure IV- 6: Schéma de la thermogravimétrie

#### IV.2.3.7 Conductivité thermique

Le dispositif utilisé pour mesurer la conductivité thermique est le  $\lambda$ -Meter EP 500e<sup>®</sup> (cf. Figure IV- 7) du Laboratoire LaSIE, basé sur la méthode de la plaque chaude gardée conformément aux normes EN 12664 [22] et EN 12667 [23]. Le principe est de reproduire les conditions de transfert de chaleur à travers l'échantillon de surface 15\*15 cm<sup>2</sup> dans notre cas, et d'épaisseur 5cm par deux plans parallèles.

L'échantillon est placé entre une plaque froide et une plaque chaude et est soumis à un gradient fixé de température. Un anneau de garde autour de la zone de mesure assure le transfert unidirectionnel à travers l'épaisseur de l'échantillon. L'épaisseur et la surface de l'échantillon sont mesurées par le  $\lambda$ -Meter EP 500e<sup>®</sup>, et la conductivité thermique est déduite dès lors que le régime permanent soit atteint selon la relation suivante :

$$\lambda = \frac{Q.e}{\Delta T.A} = \frac{U.I.e}{\Delta T.A}$$

e [m] : l'épaisseur de l'échantillon

A [m<sup>2</sup>] : surface de l'échantillon

$\Delta T$  [K] : différence de température entre les deux plaques.

Q[W]=U[V]. I[A] est la puissance électrique fournie.

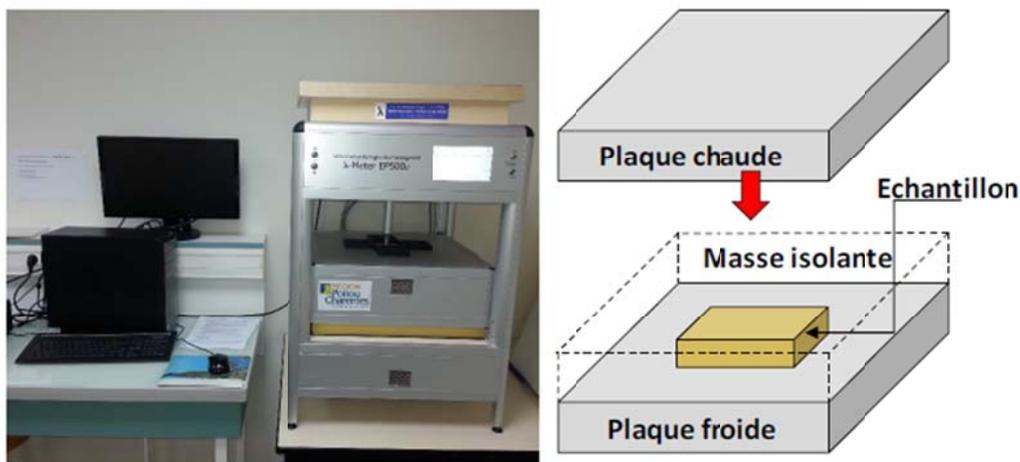


Figure IV- 7: Lambda-meter Ep 5000<sup>e</sup> –LaSIE

#### IV.2.3.8 Chaleur spécifique

La chaleur spécifique est évaluée par un calorimètre à flux de type Calvet BT 2.15<sup>®</sup>, conformément à la norme NF EN 821-3 [24]. Le calorimètre est un outil indispensable dans la caractérisation des matériaux. La chaleur spécifique est mesurée par le calorimètre Calvet BT 2.15 (cf. Figure IV- 8). L'avantage de cet appareil réside dans le fait que 175 capteurs thermocouples entourent entièrement la cellule portant l'échantillon et la totalité de la chaleur émise et ainsi mesurée par des capteurs fluxmétriques (mesure 3D).

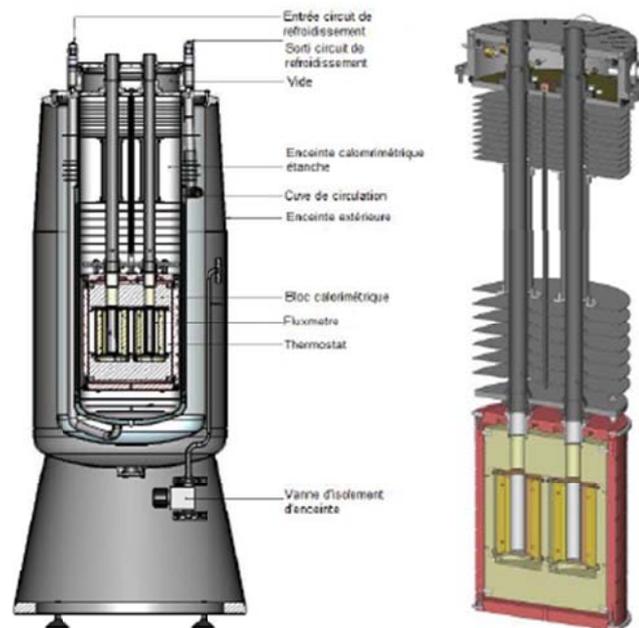


Figure IV- 8: Calorimètre CALVET BT 2.15 –LaSIE-

Le calorimètre est essentiellement composé d'une enceinte cylindrique parfaitement étanche, contenant une cellule de mesure dans laquelle l'échantillon à étudier est placé, et une cellule de référence contenant un produit inerte thermiquement. Chaque cellule possède une douille et un fluxmètre tridimensionnel. Le fluxmètre est une série d'anneaux de thermocouples permettant de détecter les flux de chaleur. La Figure IV- 8 représente une vue en coupe du dispositif de mesure. Le calorimètre est connecté à un cryostat à haute performance pour réguler sa température intérieure. Une canalisation de pompage est aussi reliée au calorimètre afin d'assurer la mise sous vide de l'enceinte calorimétrique, puis l'injection de l'azote afin d'éviter tout risque de condensation. En effet, la chaleur spécifique est évaluée en fonction de la température de l'essai. L'échantillon est de forme cylindrique de 1 cm de diamètre et 5 cm de hauteur. L'essai est réalisé avec une rampe de température de  $-15^{\circ}\text{C}$  jusqu'à  $40^{\circ}\text{C}$ . La vitesse de chauffe est de  $0,1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ . Les cellules utilisées sont des cellules standards, elles sont conçues spécialement pour les études de solides ou de produits pulvérulents à faible tension de vapeur avec une pression interne allant jusqu'à 500 KPa. La quantité de chaleur échangée par l'échantillon est mesurée par le biais du fluxmètre 3D qui permet de remonter à la chaleur spécifique du matériau étudié. La variation de la chaleur suit les séquences suivantes et comme le montre la Figure IV- 9 :

Séquence 1 : Isotherme Température départ : -10°C

Durée : 43200 s

Température fin : -10°C

Séquence 2 : Rampe Température départ : -10°C

Vitesse : 0,1°C/min

Température fin : 45°C

Séquence 3 : Isotherme Température départ : 45°C

Durée : 10800 s

Température fin : 45°C

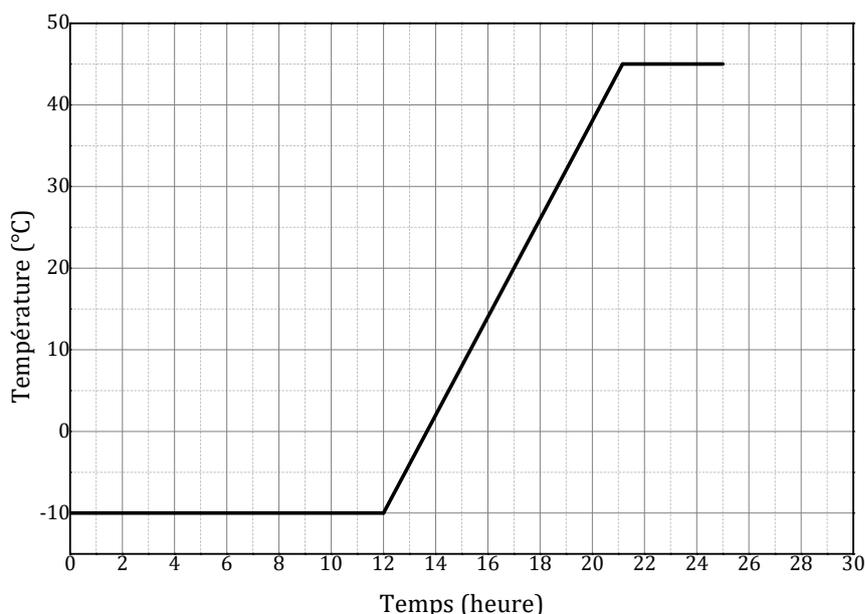


Figure IV- 9: Les séquences de changement de température du dispositif Calvet BT 2.15

#### IV.2.3.9 Perméabilité à la vapeur d'eau

Le coefficient de la perméabilité à la vapeur d'eau est déterminé par la méthode de la coupelle décrit par la norme NF EN ISO 12572[25] moyennant l'utilisation de l'équipement GINTRONIC® Gravitest 6400 (cf. Figure IV- 10). Ce dernier se compose d'une enceinte climatique à 6 coupelles dont la pesée est automatique. La masse maximale des échantillons analysés est de 400g avec une précision de 0.0001g. Cette méthode consiste à appliquer un gradient de pression de vapeur entre deux compartiments de la coupelle. Ce gradient est

assuré tout en appliquant deux hygrométries différentes (HR = 93% à l'intérieure de la coupelle et HR = 50% à l'extérieure en utilisant des solutions salines saturées  $KNO_3$ ) pour une température de 23°C. La dimension des échantillons est de 8cm de diamètre et une épaisseur qui varie entre 1cm et 3cm. Le critère d'arrêt, synonyme de l'équilibre hydrique, est considéré atteint dès lors que la stabilité de la masse soit atteinte selon le critère décrit ci-après et ce pour 5 mesures successives :

$$\frac{m(t) - m(t + 48h)}{m(t + 48h)} \leq 0.1\%$$

Les échantillons sont conditionnés avant l'essai à une température de  $23 \pm 5^\circ\text{C}$ , et  $50 \pm 5\%$  d'humidité relative.

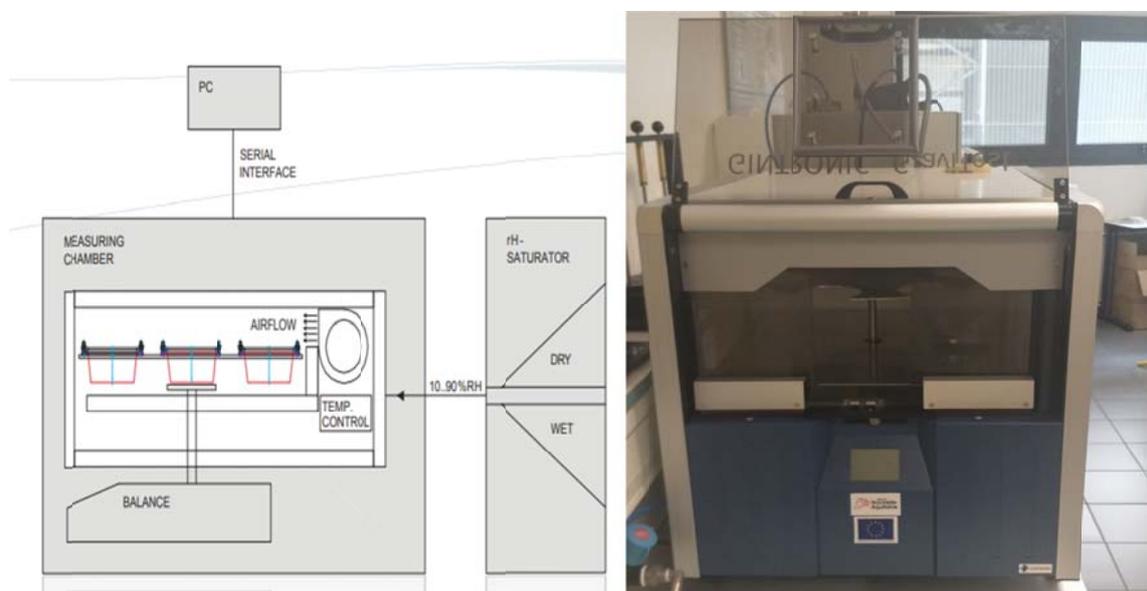


Figure IV- 10: Dispositif Gintronic Gravitest 6400

#### IV.2.3.10 Isothermes de sorption

Les isothermes de sorption-désorption permettent de connaître la capacité du matériau à capter ou à relarguer l'eau en fonction de l'humidité relative par palier d'hygrométrie croissante et puis décroissante pour une température constante selon la norme ISO EN 12571[26].

La méthode utilisée pour déterminer les courbes de sorption-désorption est la méthode gravimétrique basée sur l'utilisation du dispositif ProUmid® [27] qui permet de tester 23 échantillons à la fois (cf. Figure IV- 11). Elle consiste à suivre la masse de l'échantillon jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint selon un critère, à une température donnée. De plus, la

technique permet d'accéder à la teneur en eau de la matière à partir des valeurs de la masse d'équilibre pour chaque palier d'hygrométrie et la masse sèche de l'échantillon. Le test se déroulera comme suit :

Les échantillons seront séchés au four à 40 °C pendant 24 h, puis placés dans des coupelles à échantillons de la chambre climatique. Le tout sera pesé pour déterminer sa masse sèche initiale. A chaque palier d'humidité relative, compris entre 0-95 % (par pas utilisé lors de cet essai de 9.5 %) et de 95 %-0 et pour  $T = 23 \text{ °C}$ , un suivi de masse au cours du temps est entrepris. La masse maximale de l'échantillon à tester est d'environ 40g avec une précision de balance de  $10^{-5}$ g. Cette technique est utilisée dans la zone hygroscopique ne dépassant pas une humidité relative maximale de 95%. Il est possible de compléter cette courbe (95% à 100 %) moyennant le recours d'une presse à membrane de Richards [28].

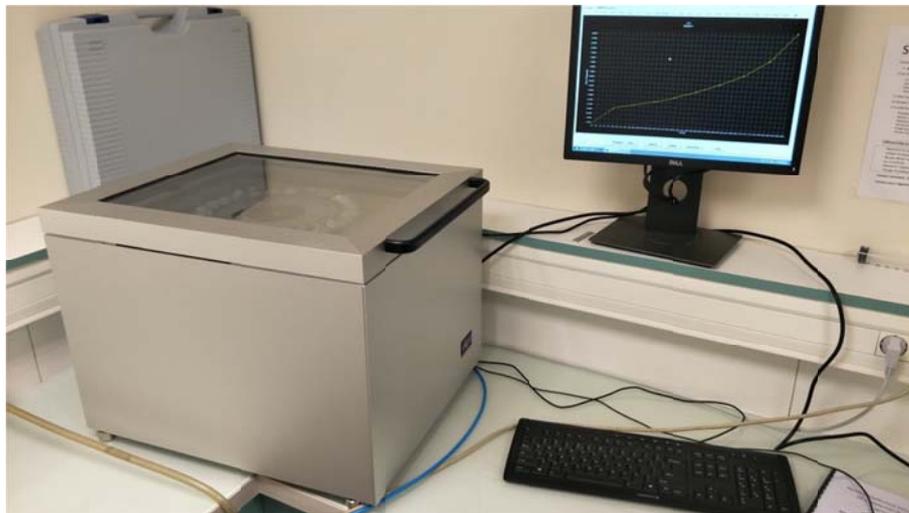


Figure IV- 11: Dispositif ProUmid<sup>®</sup>

### **IV.3 Résultats et discussion**

#### **IV.3.1 Ouvrabilité**

La Figure IV- 12 présente les valeurs de l'affaissement mesurées lors de la mise en œuvre des éco-bétons étudiés. Les résultats obtenus ont montré que l'affaissement des bétons préparés varie entre 129 et 200 mm. En effet, l'addition de la poudre de verre (GP) a conduit à une amélioration pouvant toucher les 55%, emmenant ainsi la consistance du béton du très plastique au fluide. Les résultats obtenus peuvent être liés à la finesse de mouture de la poudre de verre et de la fumée de silice utilisées. En effet, la poudre de verre présente une finesse moins importante que le ciment (Figure IV- 2), ce qui fait que cette dernière nécessite moins

d'eau pour son hydratation. Ceci libère un peu d'eau destinée à l'hydratation lors de la substitution du ciment par la poudre de verre, conduisant ainsi à une augmentation de la maniabilité du mélange. Cette explication est inversement valide dans le cas de l'utilisation de la fumée de silice, c'est pour cela l'ajout de cette dernière engendre une diminution au niveau de l'ouvrabilité du béton.

Par ailleurs, les améliorations obtenues permettent de faciliter donc la mise en œuvre tout en réduisant les coûts relatifs à la vibration et au temps de coulage et offrent la possibilité d'utiliser ces bétons dans les éléments fortement ferrillés. En outre, l'incorporation de la poudre de verre et de la fumée de silice comme substituants du ciment présente en plus des avantages précités, l'intérêt de réduction de la quantité d'adjuvant tout en restant dans la gamme des bétons très plastique [29]. Ceci est le synonyme d'une réduction du coût global du mètre cube de béton.

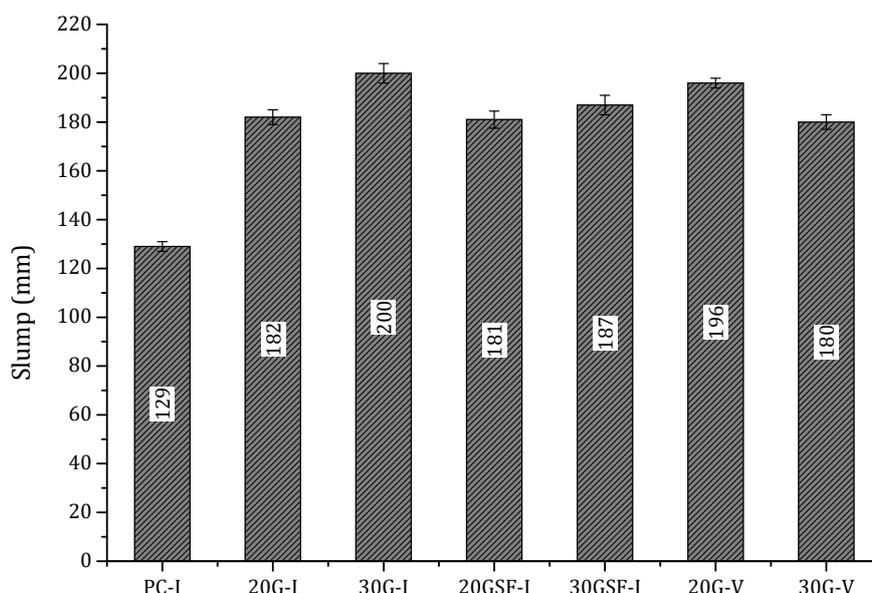


Figure IV- 12: L'affaissement des bétons étudiés

### IV.3.2 Résistance à la compression

La Figure IV- 13 montre la résistance à la compression des bétons utilisés à l'âge de 28 et 91 jours. Les résistances à la compression à 28 jours de tous les éco-bétons contenant de la poudre de verre sont inférieures à celles du béton témoin (PC-I) mais restent suffisantes pour la construction selon la réglementation européenne (fourchettes entre 26 et 38 MPa). Ceci est dû à un effet de dilution qui est la conséquence immédiate de la substitution d'une poudre plus réactive (ciment) par une poudre moins réactive (poudre de verre) à court terme [30]. Pour le

ciment Portland ordinaire CEMI, l'hydratation maximale et la formation de C-S-H sont obtenues à court terme (28 jours) par rapport aux éco-matériaux avec de la poudre de verre et de la fumée de silice. Ces dernières sont connues par des réactions pouzzolaniques à long terme (plus de 90 jours).

Pour toutes les formulations de bétons étudiées, aucun ajout minéral ne permet d'obtenir une résistance à la compression particulièrement différente des autres à 28 jours. La différence entre les niveaux développés par les bétons avec les différents ajouts minéraux est négligeable. Cependant, il faut noter que les résistances à la compression des bétons à la fumée de silice et/ou à la poudre de verre sont relativement similaires à celles des bétons à base de CEMV. Le PC-I atteint sa résistance maximale à la compression d'environ 57 MPa à 28 jours et reste relativement constant dans le temps. Néanmoins, la résistance à la compression des éco-bétons avec de la poudre de verre continue à augmenter entre 28 et 91 jours (+ 5 MPa pour 20G-I, 30G-I, 20G-V et 30G-V et + 10 MPa pour 20GSF-I et 31GSF-I). Cette augmentation est due à la réaction entre la Portlandite et la silice de la poudre de verre et de la fumée de silice, puis à la formation de C-S-H (réaction pouzzolanique [7, 8, 24]). Cette observation est confirmée par la diminution du  $\text{CaCO}_3$  formé après l'ajout de la poudre de verre expliquée par la consommation de Portlandite pour former du C-S-H [31]. D'autres explications sont données lors de l'analyse thermogravimétrique.

En général, les bétons contenant de la poudre de verre ont une résistance à la compression satisfaisante pour la construction. Par conséquent, la poudre de verre peut être incorporée jusqu'à 20 % et 30 % en remplacement partiel du ciment dans le béton sans affecter sa résistance à la compression tout en réduisant l'empreinte carbone de ces matériaux.

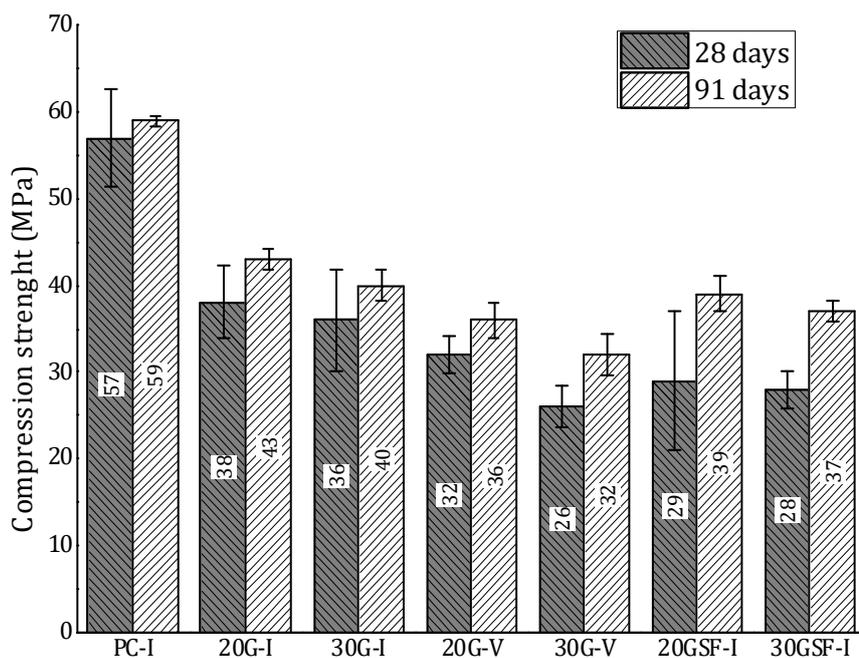


Figure IV- 13: La résistance à la compression des bétons étudiés

La Figure IV- 14 résume les travaux de la littérature étudiant l'effet de l'incorporation de poudre de verre dans le béton sur leur résistance à la compression à 28 jours. La base de données sur la résistance à la compression correspond à 10 études expérimentales de la littérature [3, 4, 23–30]. D'une façon générale, nos résultats sont en accord avec ceux de la littérature. Aussi, le comportement mécanique de l'éco-béton de la présente étude a montré une tendance à la baisse avec le ratio de remplacement des GP. En outre, des exceptions peuvent être observées dans certaines études où le taux de remplacement était de 10 %, ce qui donne la plus grande résistance des mélanges durcis.

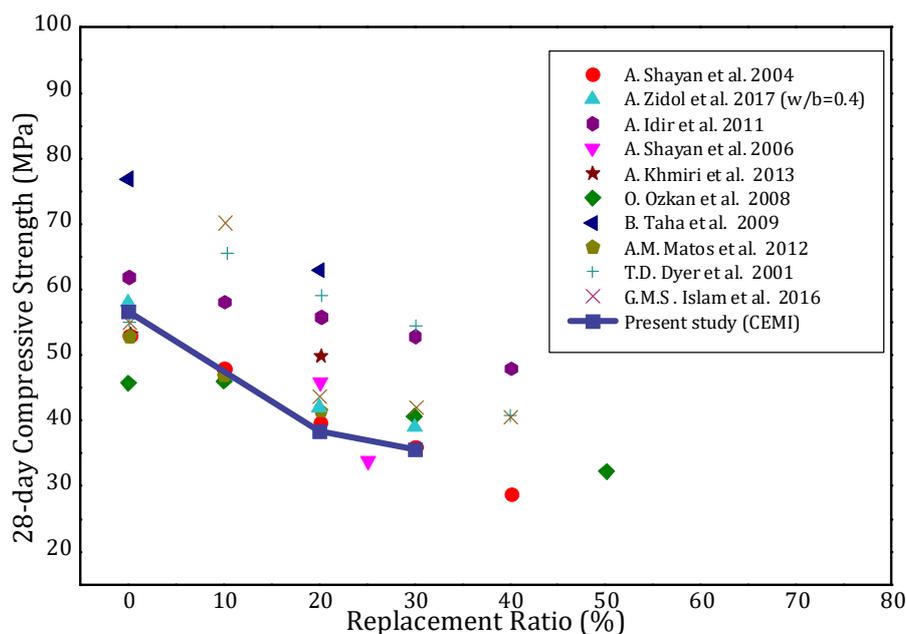


Figure IV- 14: Effet du ratio de remplacement du GP sur la résistance à la compression à 28 jours du mortier et du béton

### IV.3.3 Porosité accessible à l'eau et par intrusion de mercure

Les résultats des porosités à l'eau et au mercure des bétons à l'âge de 28 jours sont présentés dans la Figure IV- 15. Pour chaque béton, la porosité moyenne à l'eau et son écart-type obtenu à partir de trois mesures ont été présentés. Il est constaté que la porosité du béton témoin à base de CEMI (PC-I) est d'environ 13%, ce qui est en accord avec la littérature [38]. De plus, une substitution de 20 % et 30 % du ciment par de la poudre de verre (20G-I et 30G-I) affecte légèrement la porosité du béton, compte tenu des valeurs des écarts types. Une légère augmentation de la porosité moyenne de 20G-I et 30G-I a été relevée par rapport au PC-I [39]. Cependant, la porosité des bétons avec CEMV et 5% de SF diminue par rapport à ceux contenant uniquement de la poudre de verre et du CEMI, principalement pour 20G-V et 20GSF-I. Cette diminution est due à la réaction pouzzolanique des ajouts minéraux dans le CEMV et aux fumées de silice qui affinent la porosité du béton, comme le montre la littérature [7, 33]. Enfin, la différence entre la porosité accessible à l'eau et par intrusion de mercure reflète le fait que la porosimétrie de l'eau peut détecter une plus grande variété de pores par rapport à celle par intrusion de mercure.

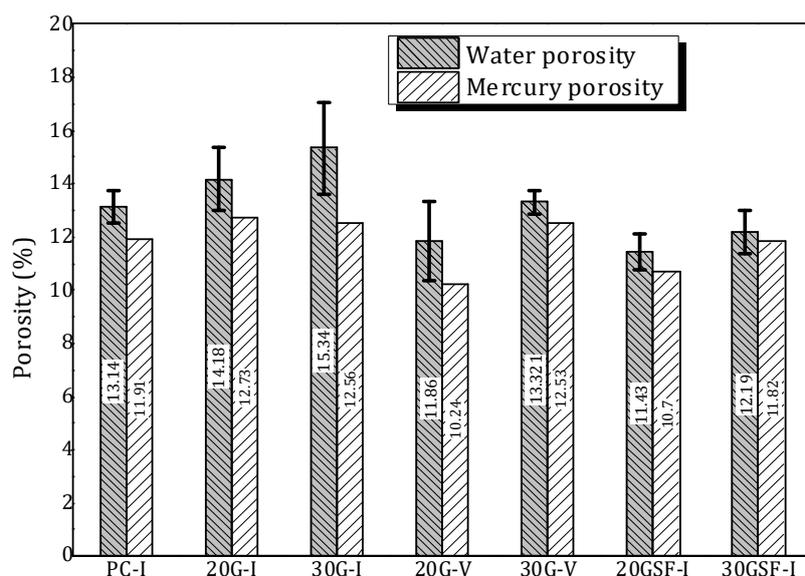


Figure IV- 15: La porosité accessible à l'eau et par intrusion de mercure des bétons étudiés

La Figure IV- 16 montre la distribution de la taille des pores des bétons obtenus par le MIP. Les distributions de pores de PC- I, 20G-I et 30G-I sont généralement monomodales. Pour 20G-I et 30G-I, on note une formation d'autres plages de micropores plus fines que  $0,01\mu\text{m}$  qui confirme l'augmentation de la porosité pour 20G-I et 30G-I par rapport au béton témoin. Cependant, l'incorporation de CEMV et de 5% de SF a créé un second type de diamètre de pores et a lentement diminué le diamètre critique des pores. Cette diminution pourrait confirmer le raffinement de la porosité des bétons avec de la poudre de verre ; CEMV et SF (cf. Figure 15). En général, on relève que 30% de la poudre de verre augmente le diamètre des grands pores, principalement, pour 30 G-V et 30 G-SF par rapport à 20 G-V et 20 G-SF. Ces résultats sont en accord avec ceux de la porosité indiqués ci-dessus (cf. Figure IV- 15).

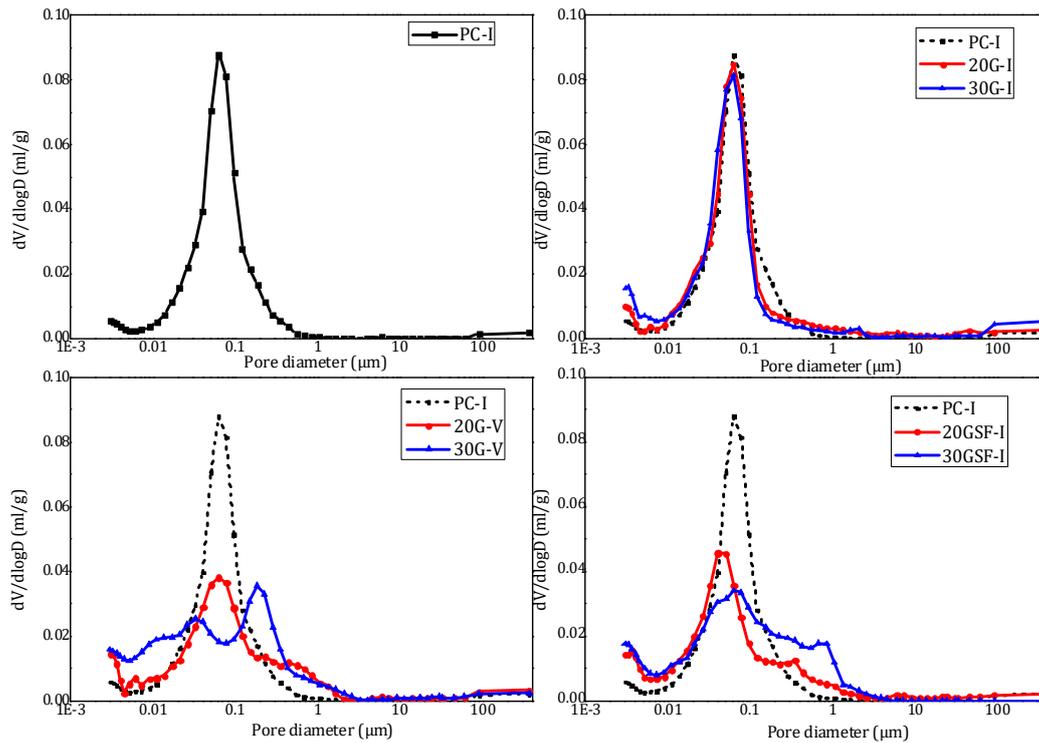


Figure IV- 16: Distribution des tailles de pores des bétons étudiés

#### IV.3.4 Analyse de la microstructure par Microscope Electronique à Balayage MEB

Les Figure IV- 17, Figure IV- 18et Figure IV- 19 montrent les images MEB des éco-bétons utilisés et les distributions élémentaires correspondantes (spectres EDX) données par l'EDX de EDAX/GEMINI (un détecteur au silicium dopé au lithium Si:Li).

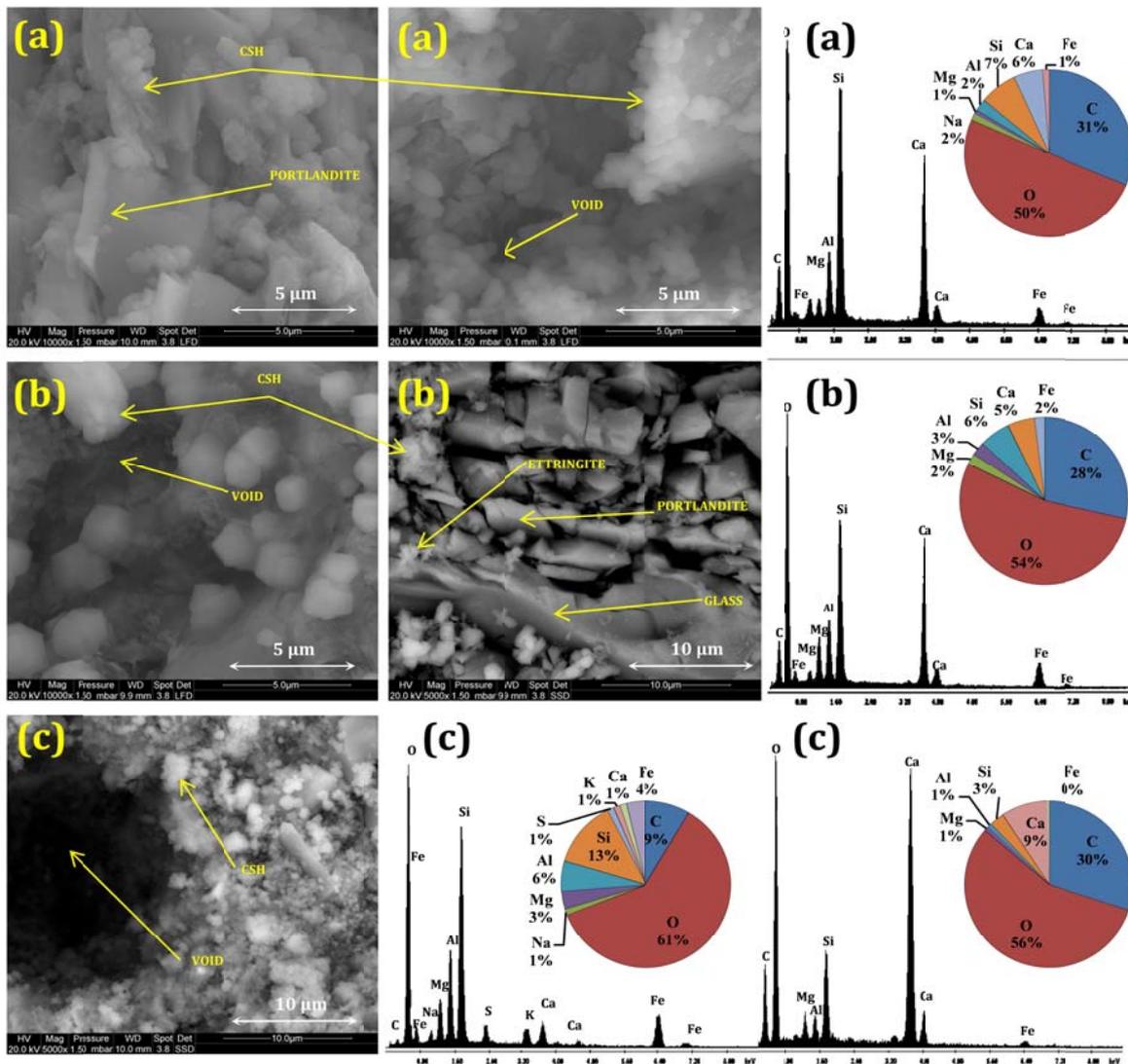


Figure IV- 17: Images MEB et analyse EDX de PC-I (a), 20G-I (b) et 30G-I (c).

Les images MEB et les spectres EDX de PC-I, 20G-I et 30G-I sont présentés respectivement sur les Figure IV- 17 a, b et c. Ces analyses montrent clairement la formation de gel C-S-H dans les pores de tous les matériaux. En outre, on peut observer sur les mêmes images que le PC-I (béton de contrôle sans verre et sans ajout de minéraux) présente un petit volume de vides entre le C-S-H. Pour le 20G-I et le 30G-I (avec respectivement 20 % et 30 % de poudre de verre et de CEMI), plus le taux de poudre de verre est élevé, plus les vides sont importants. C'est pourquoi, les images MEB concordent avec les résultats de la porosité et de la distribution de la taille des pores. La formation de C-S-H est due à la réaction pouzzolanique de la poudre de verre avec la portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  [31].

Les spectres EDX d'un spot donnant la distribution élémentaire d'une phase solide (supposée être C-S-H) montrent que la quantité de Ca et de Si reste relativement constante entre le béton

avec et sans poudre de verre. Des analyses supplémentaires s'avèrent nécessaires dans les travaux futurs afin de quantifier correctement la quantité de C-S-H dans l'éco-béton et la formation possible de C-S-H due à la réaction pouzzolanique comme indiqué ci-dessus.

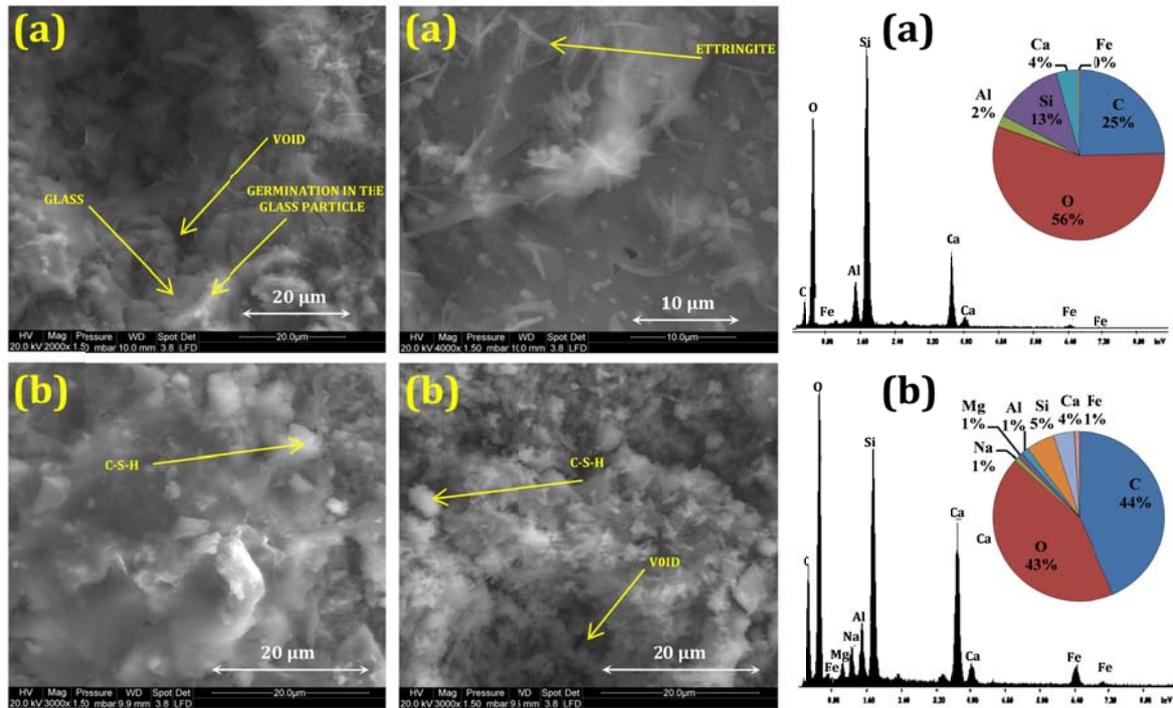


Figure IV- 18: Images MEB et analyse EDX de 20G-V (a) and 30G-V (b).

Les images MEB et les spectres EDX de 20G-V et 30G-V (avec respectivement 20% et 30% de poudre de verre et CEMV) sont présentés sur les Figure IV- 18 a et b. L'utilisation de CEMV a permis de fermer les pores et de créer d'autres gammes de pores, ce qui est en accord avec les résultats de la porosité. On constate que la germination du gel C-S-H apparaît à la surface du verre et favorise le durcissement de la pâte de ciment. Ceci est observé dans plusieurs travaux sur la réutilisation du verre dans la pâte cimentaire, comme le montre les exemples suivants [31,39].

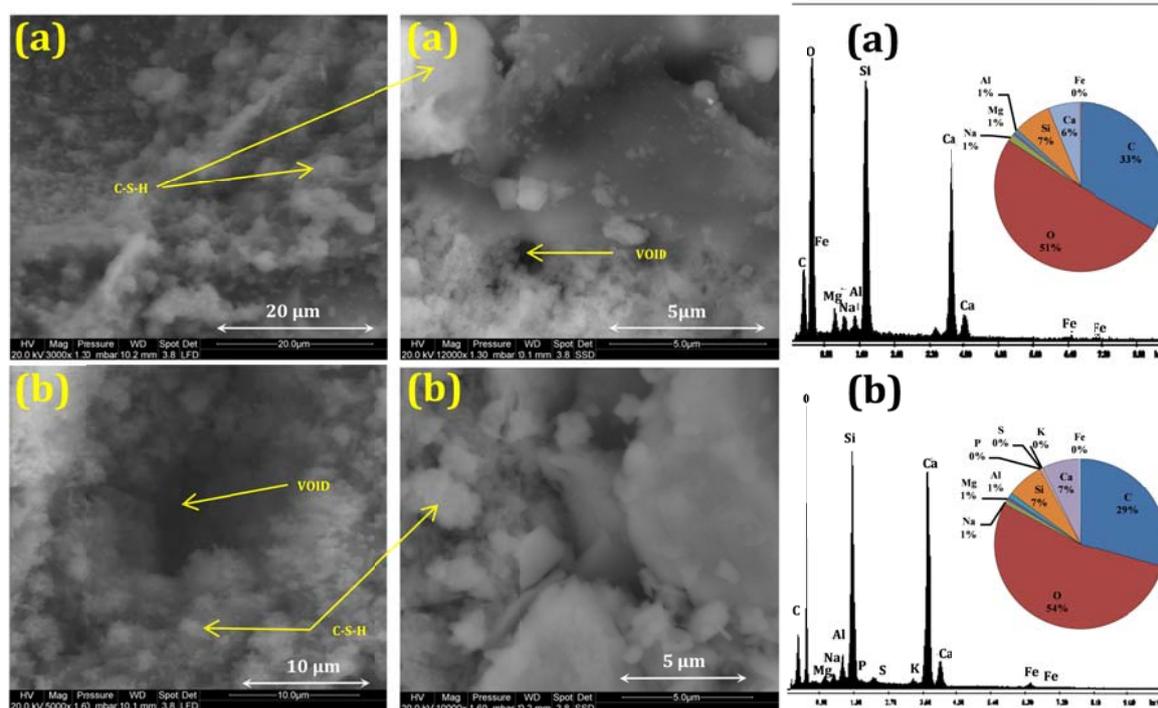


Figure IV- 19: Images MEB et analyse EDX de 20GSF-I (a) and 30GSF-I (b).

Les images MEB et les spectres EDX de 20GSF-I et 30GSF-I sont présentés respectivement sur les Figure IV- 19 a et b. Les 20GSF-I et 30GSF-I dans la pâte cimentaire étaient sensiblement plus denses que le PC-I, ce qui indique une très faible porosité, conformément aux conclusions de la littérature [41–43] et confirme les résultats de porosité trouvés précédemment. Des pores d'air sphériques induits ou piégés ont également été observés dans la pâte cimentaire, comme le montre la Figure IV- 19.a. La plupart de ces pores se sont formés sous l'effet secondaire de la quantité de superplastifiant utilisée [44].

### IV.3.5 Analyse Thermogravimétrique ATG

Les résultats de l'analyse thermogravimétrique des bétons étudiés sont présentés sur la Figure IV- 20. Pour chaque courbe dTG, les trois phases principales sont mentionnées. La première phase entre 30°C-145°C correspond à l'eau libre de l'échantillon [45–48]. On note une perte d'eau physiquement liée d'environ 3% de sa masse initiale pour les PC-I, 20G-I, 30G-I, et 2% des bétons avec substitution de fumée de silice ou CEMV qui ont une demande d'eau plus élevé [20][11]. La deuxième partie reflète le rejet de l'eau chimiquement liée de la portlandite. Des Pertes d'eau de 3% pour le PC-I, de 2% pour le 20G-I et le 30G- I et environ 1% pour les autres bétons testés sont relevées. Les derniers bétons contiennent une faible quantité de portlandite qui est consommée par la réaction pouzzolanique de la poudre de verre, de la

fumée de silice et des cendres volantes [31,49]. La troisième phase correspond à la décarbonation du  $\text{CaCO}_3$  à  $750^\circ\text{C}$ . Ainsi, il est noté une décarbonation élevée du PC-I en  $\text{CaCO}_3$  par rapport aux autres bétons qui confirment la quantité élevée de portlandite dans le PC-I sans ajout de minéraux et sans réaction pouzzolanique [50]. Les résultats d'ATG/dTG sont en concordance avec les images MEB montrant la quantité de portlandite dans les bétons utilisés avec et sans poudre de verre.

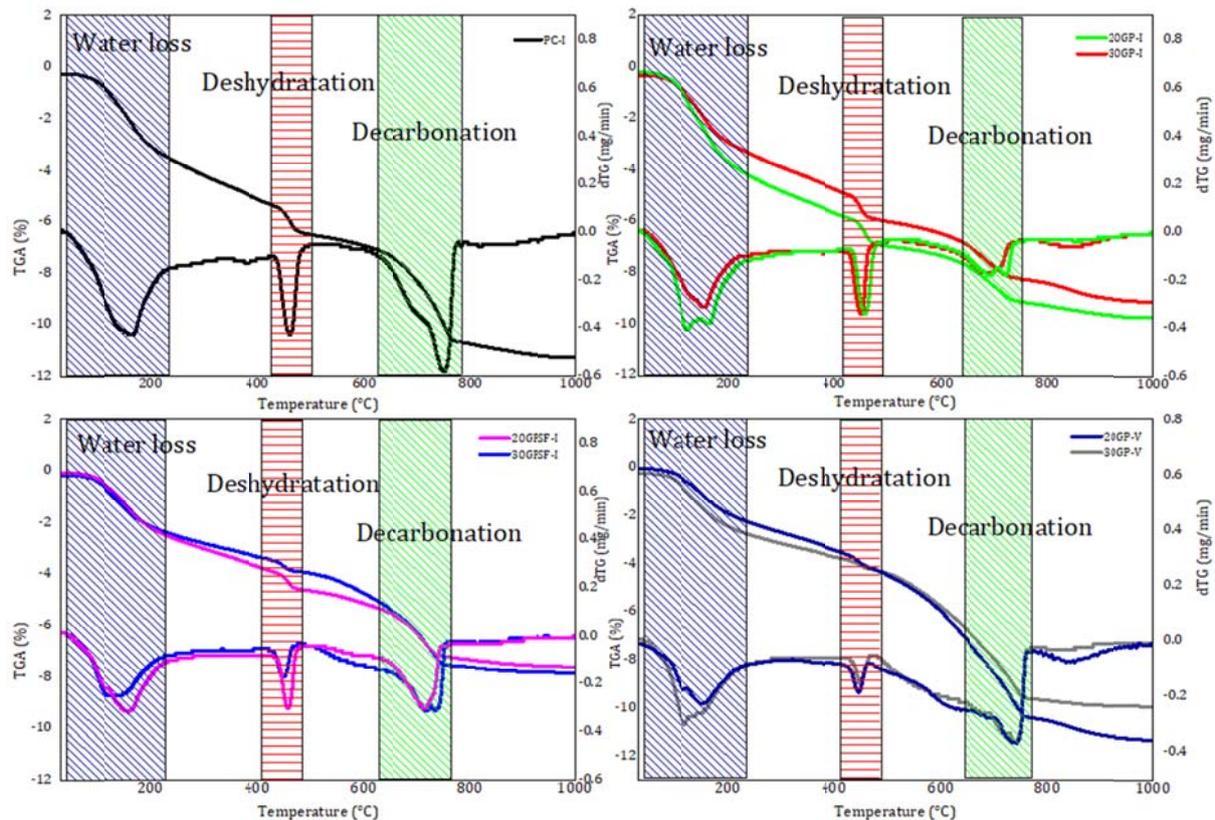


Figure IV- 20: ATG/ dTG des bétons étudiés

### IV.3.6 Conductivité thermique

Les Figure IV- 21 et Figure IV- 22 montrent l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la porosité et de la densité des bétons testés respectivement. Il est constaté, en premier abord, le remplacement du ciment par 20 % et 30 % de poudre de verre diminue la conductivité thermique des éco-bétons. La réduction de la conductivité thermique et la densité sont dues à l'augmentation de la porosité des bétons avec de la poudre de verre, comme le montre Figure IV- 15. Cependant, l'incorporation de CEMV et de fumées de silice dans les bétons a diminué leur porosité totale et a modifié la distribution des pores en créant un second type de diamètre de pores et en faisant apparaître des micros et les macropores comme le

montre la Figure IV- 16. Ces considérations sont à l'origine de la diminution de leur conductivité thermique.

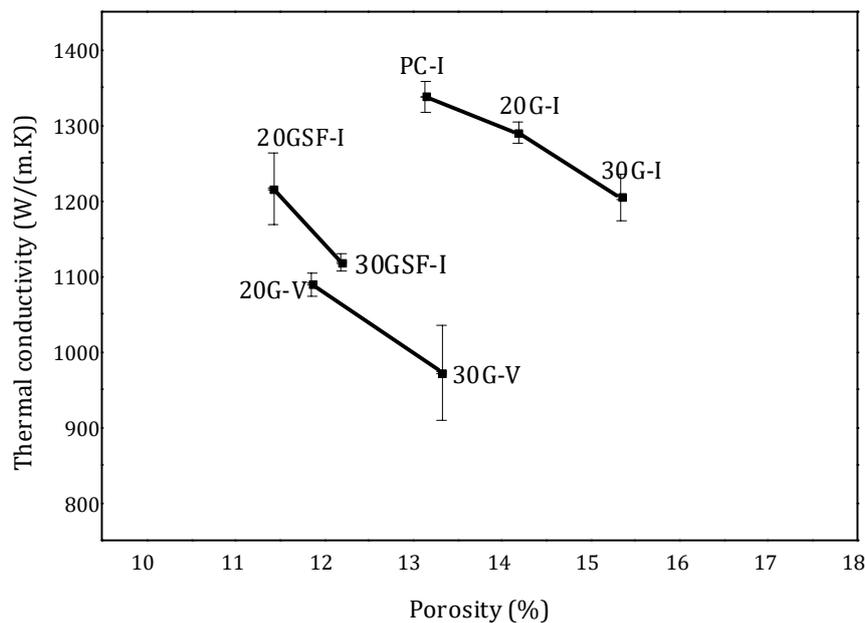


Figure IV- 21: La conductivité thermique des bétons étudiés

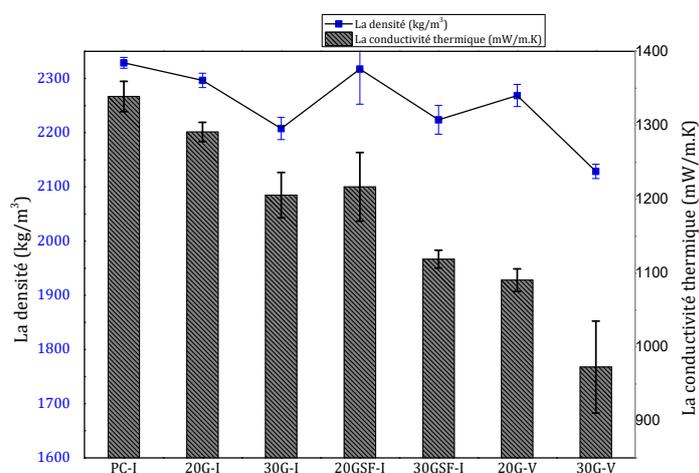


Figure IV- 22: La conductivité thermique en fonction de la densité des matériaux

La Figure IV- 23 montre l'effet de la température sur la conductivité thermique des bétons étudiés. Cette propriété a été déterminée pour trois températures différentes (10, 23 et 30 °C) jusqu'à la stabilisation de la mesure. Les valeurs de la conductivité thermique évoluent d'une façon quasi-linéaire en fonction de la température. Ces résultats sont en concordance avec ceux de la littérature [51][28]. De plus, ces mêmes résultats, notamment ceux de la figure,

mettent en évidence la forte dépendance de cette propriété de la structure poreuse du béton étudié.

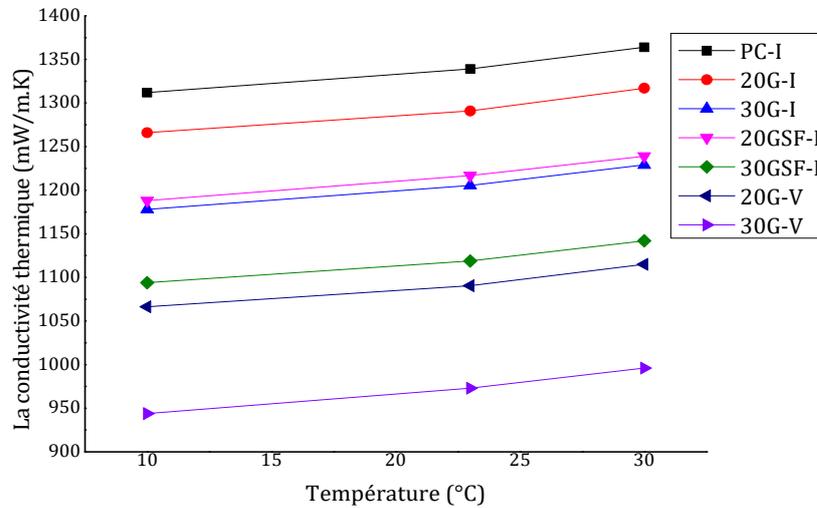


Figure IV- 23: L'évolution de la conductivité thermique en fonction de la température de l'échantillon

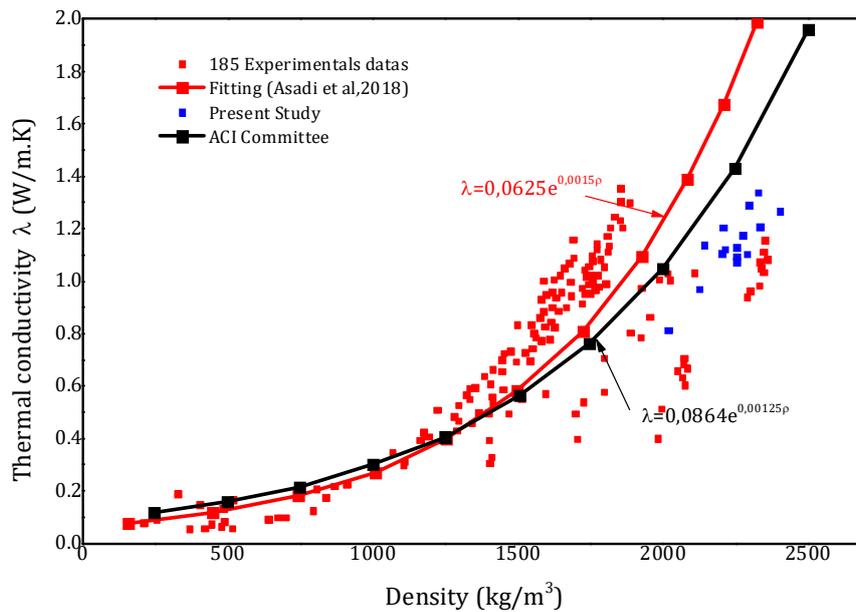


Figure IV- 24: La conductivité thermique des éco-bétons en fonction de la densité.

La Figure IV- 24 illustre les résultats de la conductivité thermique des éco-bétons utilisés en fonction de leur densité. Il y figure également une base de données de collectée à partir de 12 travaux correspondant à 185 mesures expérimentales de la littérature [52–63] sur l'évolution de ce paramètre thermique en fonction de la densité. On y retrouve notamment l'ajustement présenté par Asadi et al, 2018 [64]. Aussi, la Figure IV- 24 montre l'ajustement de la

conductivité thermique en fonction de la densité proposée par le comité ACI « American Concrete Institute» [65]. Les fonctions empiriques correspondantes aux ajustements sont également présentées. Les résultats de notre investigation étude sont plus conformes à ceux proposés par le Comité ACI.

#### IV.3.7 Chaleur spécifique

La Figure IV- 25 présente les valeurs de la chaleur spécifique des bétons obtenue par le calorimètre Calvet. Une petite différence qui peut être négligée entre valeurs de  $C_p$  obtenues des bétons à base de CEMI et CEMV est d'environ  $0,02 \text{ J}/(\text{g}\cdot\text{K})$ . Les bétons à base de CEMV contiennent une forte teneur en laitier et en cendres volantes, ce qui réduit la chaleur spécifique [28,66]. Pour tous les bétons, la chaleur spécifique augmente sensiblement entre  $-10^\circ\text{C}$  et  $0^\circ\text{C}$ . Cela peut être expliqué par le changement de phase de l'état d'eau qui passe du solide au liquide. Ainsi, une augmentation de 10% a été constatée entre  $0^\circ\text{C}$  et  $40^\circ\text{C}$ . De plus, la substitution du ciment par 20 % et 30 % de GP diminue la chaleur spécifique d'environ  $0,012 \text{ J}/(\text{g}\cdot\text{K})$  pour le 20GP-I et de  $0,025 \text{ J}/(\text{g}\cdot\text{K})$  pour le 30GP-I par rapport au béton témoin PC-I avec seulement le CEMI. Enfin, 5 % des fumées de silice affectent légèrement la chaleur spécifique des éco-bétons en raison de la différence de chaleur spécifique entre la silice et le ciment [66].

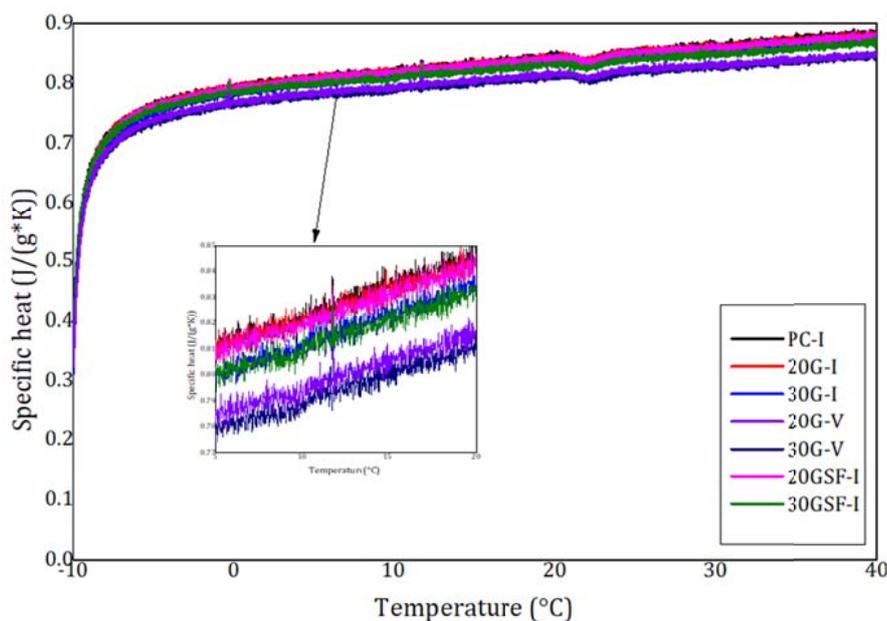


Figure IV- 25: La chaleur spécifique des bétons étudiés

### IV.3.8 Perméabilité à la vapeur d'eau

Les résultats de la perméabilité à la vapeur d'eau sont indiqués dans la Figure IV- 26 en utilisant la méthode de la coupelle humide. Les résultats mettent en évidence une augmentation de la perméabilité à la vapeur d'eau avec la substitution du ciment par la poudre de verre dans tous les éco-bétons testés. Cela s'explique par l'augmentation de la porosité et le changement de la microstructure, comme mentionné ci-dessus: porosité, distribution de la taille des pores et éventuellement la tortuosité et la constructivité, dus à l'hydratation du liant (ciment + poudre de verre) et à la réaction pouzzolanique de la poudre de verre incorporée dans le béton. En outre, il a été noté que l'utilisation de CEMV et des fumées de silices dans les bétons augmente leur perméabilité à la vapeur d'eau par rapport au béton de référence (PCI), malgré la diminution de leurs porosités. Cette augmentation est due à la distribution porale des bétons contenant les de CEMV et des fumés de silices montrant une apparition d'une nouvelle famille de gros pores supérieurs à  $0.5\mu\text{m}$  (cf. Figure IV- 16). De plus, la mesure de la perméabilité à la vapeur elle-même (essai de la coupelle jusqu'à 1 mois) pourrait affecter la réaction pouzzolanique de ces matériaux et donc leurs microstructure. Cette constatation nécessite d'autres investigations expérimentales telles que la microtomographie aux rayons X afin de mieux appréhender ce processus.

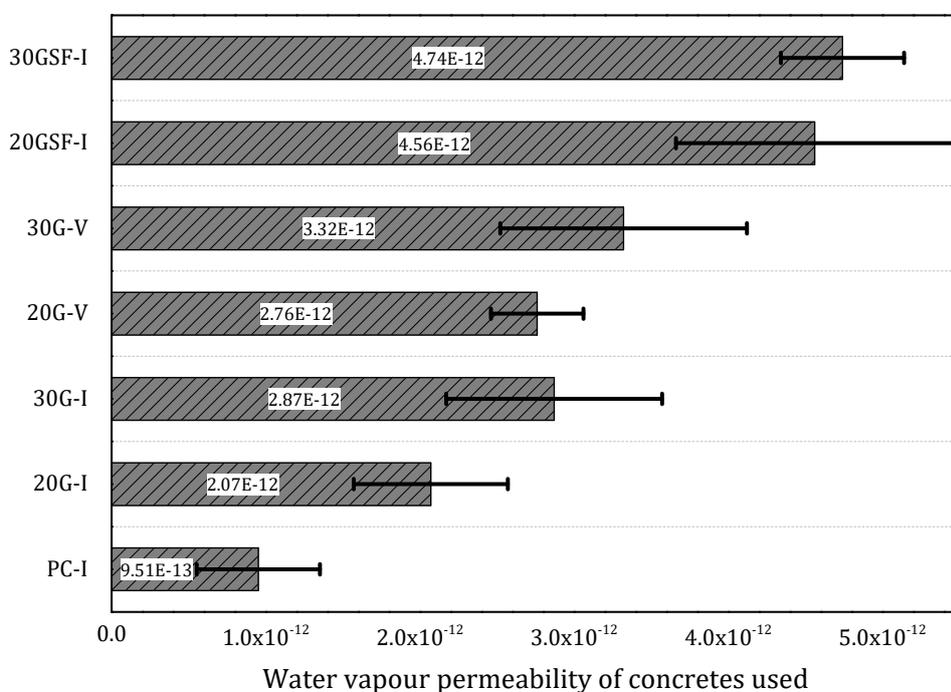


Figure IV- 26: La perméabilité à la vapeur d'eau des bétons étudiés [kg/m.s.Pa].

### IV.3.9 Isotherme de sorption et la capacité hydrique

La Figure IV- 27 montre les isothermes de sorption moyennes de ces matériaux et leurs écarts-type pour trois mesures à l'âge de 90 jours. Elle met en évidence l'effet de la poudre de verre et des fumées de silice sur la diffusion de la vapeur d'eau et les isothermes de sorption. Il a été constaté que la capacité hydrique de ces bétons est presque identique dans la zone super-hygroscopique (HR>90%). Aussi, il a été observé une augmentation de l'aire de la boucle d'hystérésis avec le remplacement du ciment par la poudre de verre et les fumées de silice. Ces dernières (GP, SF) modifient non seulement la porosité mais aussi la distribution de la taille des pores, caractérisées par une apparition des micropores de l'ordre de 0.005 $\mu$ m. Pour ce qui est du phénomène de l'hystérésis qui demeure complexe et mal maîtrisé. Il est noté que la valeur de la teneur en eau, à l'équilibre, est plus élevée pour la désorption. Ce phénomène est généralement attribué à l'emprisonnement de l'eau dans de grands pores entourés de petits pores. Ce phénomène est connu par « L'effet de bouteille d'ancre "Ink Bottle Effect" [67] ». En outre, cette différence entre ces deux courbes peut également être attribuée aux changements de l'angle de contact entre l'eau adsorbée et la surface des pores du matériau et au rayon de courbure du ménisque d'eau. En effet, pendant le cycle de séchage, la couche d'eau du ménisque présente à la surface des micropores « capillaires ». Ces derniers sont en contact avec une surface entièrement humide. Alors que durant le cycle d'humidification, l'eau adsorbée est en contact avec une surface sèche (pas encore humide) [68].

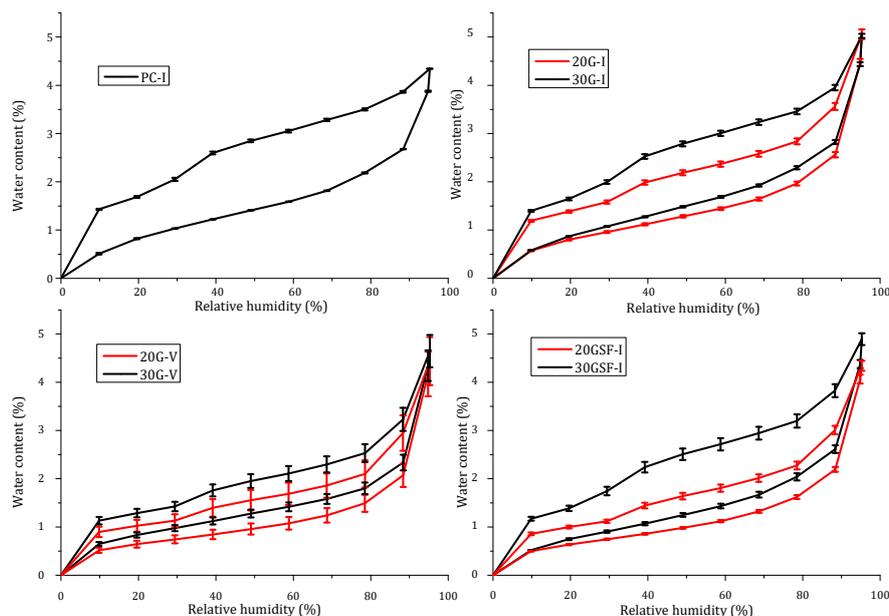


Figure IV- 27: Les courbes d'isothermes de sorption-désorption des bétons étudiés

Afin d'étudier l'effet de l'incorporation de la poudre de verre et de la fumée de silice dans les éco-bétons sur la capacité de stockage de l'humidité, cette dernière a été déduite des isothermes de sorption pour chaque béton. Elle représente la capacité du matériau à adsorber et à libérer l'humidité. Ce paramètre (noté  $C_m$ ), est souvent utilisé pour la modélisation du transfert hydrique. Les courbes de la capacité de stockage de l'humidité sont présentées sur la Figure IV- 28. Pour une humidité élevée (>80 %), la présence de poudre de verre dans les éco-bétons accroît leur capacité de stockage de l'humidité par rapport au béton témoin (PC-I). Ceci est attribué à l'effet de la porosité sur ce paramètre intrinsèque de transfert de masse. D'une part, comme la poudre de verre est moins perméable, elle ralentit la diffusivité et le stockage de l'humidité. D'autre part, étant donné la forme angulaire des éclats de verre, introduisent de petites zones de transition interfaciale (ITZ), dans lesquelles la réaction pouzzolanique entre le verre riche en  $\text{SiO}_2$  et la portlandite  $\text{Ca(OH)}_2$  prend beaucoup de temps pour former du C-S-H qui à son tour bouchera les pores [31,39].

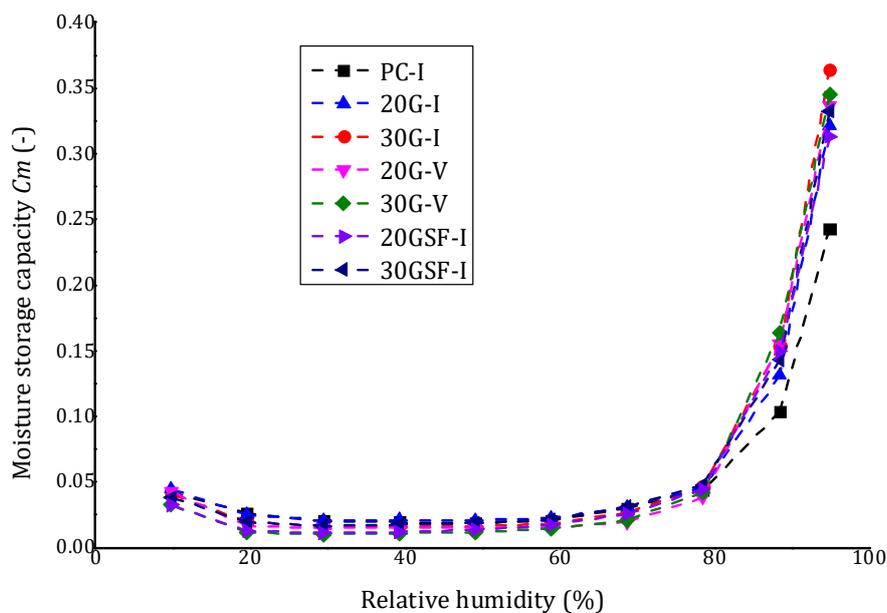


Figure IV- 28: Capacité de stockage de l'humidité des bétons étudiés.

#### IV.4 Conclusion

Ce chapitre évalue les effets du remplacement du ciment par la poudre de verre dans les bétons. La poudre de verre a été récupérée à partir de la déchèterie de La Rochelle (France) dans le but de préserver l'environnement d'une part, et de réduire l'impact environnemental des matériaux de construction d'autre part. Des éco-bétons aux différents taux de substitution du ciment CEM I par la poudre de verre et la fumée de silice, de ciment CEM V par la poudre

de verre, ont été formulés. Ces compositions de béton ont ensuite été caractérisées puis comparées. La comparaison a été menée à travers essentiellement des mesures de la résistance à la compression à 28 et à 90 jours, d'indicateurs de durabilité, et les paramètres essentiels de transferts de masse et de chaleur. Les résultats obtenus quant aux propriétés mécaniques et hygrothermiques des éco-bétons) sont généralement satisfaisants et font de ce matériau un bon éco-matériau pour la construction. Cette investigation permet de tirer les principales conclusions suivantes :

- Le remplacement massique de ciment par 20 ou 30 % de poudre de verre augmente la porosité des éco-bétons jusqu'à 20 % par rapport au béton témoin à base du ciment Portland CEMI. Cependant, l'utilisation du CEMV et de la fumée de silice avec 20% de poudre de verre diminue la porosité. En outre, l'utilisation de 20 % et 30 % de poudre de verre dans le béton diminue sa résistance à la compression à 28 jours, mais sa valeur demeure suffisante pour la construction (entre 26 et 38 MPa et présente une bonne empreinte carbone. À 91 jours de durcissement, la résistance à la compression de ces matériaux continue d'augmenter, notamment pour les matériaux contenant de la poudre de verre, des fumées de silice et des CEMV en raison de leur réaction pouzzolanique (fourchette de 32 à 43 MPa).
- Les images MEB en mode environnemental mettent en évidence la réaction pouzzolanique entre la silice présente dans le verre et la portlandite pour former plus de C-S-H. Cette dernière affecte la microstructure du matériau avec la poudre de verre.
- La présence de poudre de verre diminue leur capacité thermique d'environ 0,012 J/(g.K) pour le 20GP-I et de 0,025 J/(g.K) pour le 30GP-I par rapport au béton témoin PC-I avec CEMI. Néanmoins, 5% des fumées de silice affectent légèrement la capacité thermique des éco-bétons.
- Un remplacement de ciment par 20 % et 30 % de poudre de verre diminue la conductivité thermique des éco-bétons. Ceci s'explique par l'augmentation de la porosité constatée. Cependant, le CEMV et les 5% de SF dans les bétons ont diminué leur porosité totale puis leur conductivité thermique. Ce constat concorde aux résultats de la littérature. Il est attribué à l'apparition des pores non connectés qui ne sont pas comptabilisés dans les valeurs de la porosité.
- A partir des isothermes de sorption, il a été constaté que le remplacement du ciment par la poudre de verre augmente la capacité de stockage de l'humidité ( $C_m$ ) pour les zones super-hygroscopiques.

- L'incorporation de poudre de verre (GP) dans les éco-bétons augmente sa porosité et sa perméabilité à la vapeur d'eau. Cependant, l'utilisation de CEMV et de SF, dont il est supposé qu'ils diminuent la porosité, augmente la perméabilité à la vapeur d'eau. La présence de ces ajouts minéraux avec la poudre de verre modifie la distribution de la taille des pores du béton, augmente sa tortuosité et fait apparaître une nouvelle famille de pores d'environ  $0.005\mu\text{m}$  et  $0.5\mu\text{m}$ . Des études expérimentales supplémentaires sont nécessaires pour obtenir des explications plus détaillées.

Les résultats de cette étude hygrothermique constituent les données d'entrée du modèle numérique simulant le transfert hygrothermique dans les éco-bétons. Ce dernier montrera l'intérêt de l'utilisation de ces éco-matériaux en termes de performance énergétique, de durabilité et d'impacts environnementaux.

---

**Références bibliographiques**

- [1] EN 197-1, Ciment - Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants, (n.d.).
- [2] I. 13320-1, Analyse granulométrique — Méthodes par diffraction laser — Partie 1: Principes généraux, (1999).
- [3] NF EN ISO 18757, Céramiques techniques - Détermination de la surface spécifique (aire massique) des poudres céramiques par adsorption de gaz à l'aide de la méthode BET, (2006).
- [4] NF EN ISO 1097-7, Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 7 : détermination de la masse volumique absolue du filler - Méthode au pycnomètre, (2008).
- [5] H.R. Samtur, Glass Recycling and Reuse. Report 17, University of Wisconsin, Madison Institute for Environmental Studies, 1974.
- [6] A. Shayan, A. Xu, Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs, *Cem. Concr. Res.* 36 (2006) 457–468.  
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.12.012>.
- [7] A. Khmiri, M. Chaabouni, B. Samet, Chemical behaviour of ground waste glass when used as partial cement replacement in mortars, *Constr. Build. Mater.* 44 (2013) 74–80.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.040>.
- [8] V. Vaitkevičius, E. Šerelis, H. Hilbig, The effect of glass powder on the microstructure of ultra high performance concrete, *Constr. Build. Mater.* 68 (2014) 102–109.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.101>.
- [9] C. Çetin, S.T. Erdoğan, M. Tokyay, Effect of particle size and slag content on the early hydration of interground blended cements, *Cem. Concr. Compos.* 67 (2016) 39–49.  
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.12.001>.
- [10] S. Urhan, Alkali silica and pozzolanic reactions in concrete. Part 1: Interpretation of published results and an hypothesis concerning the mechanism, *Cem. Concr. Res.* 17 (1987) 141–152. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(87\)90068-8](https://doi.org/10.1016/0008-8846(87)90068-8).

- [11] S. Urhan, Alkali silica and pozzolanic reactions in concrete. Part 2: Observations on expanded perlite aggregate concretes, *Cem. Concr. Res.* 17 (1987) 465–477.  
[https://doi.org/10.1016/0008-8846\(87\)90010-X](https://doi.org/10.1016/0008-8846(87)90010-X).
- [12] NF EN 12350-2, Essais pour béton frais - Partie 2 : essai d'affaissement, Avril 2012, (n.d.).
- [13] NF EN 206, Béton - Spécification, performance, production et conformité - Complément national à la norme NF EN 206, (n.d.).
- [14] NF EN 12390-2, Confection et conservation des éprouvettes pour essais de résistance, (n.d.).
- [15] A. Younsi, P. Turcry, E. Rozière, A. Aït-Mokhtar, A. Loukili, Performance-based design and carbonation of concrete with high fly ash content, *Cem. Concr. Compos.* 33 (2011) 993–1000. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.07.005>.
- [16] AFPC-AFREM, Durabilité des bétons : Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité, 2007.
- [17] A. Trabelsi, Études Numérique Et Expérimentale Des Transferts Hygrothermiques Dans Les Matériaux Poreux De Construction, Thèse de Doctorat de l'Université de La Rochelle, 2010.
- [18] ASTM D4404–84, Standard Test Method for Determination of Pore Volume and Pore Volume Distribution of Soil and Rock by Mercury Intrusion Porosimetry, 1998.
- [19] E. Conforto, N. Joguet, P. Buisson, J. Vendeville, C. Chaigneau, T. Maugard, An optimized methodology to analyze biopolymer capsules by environmental scanning electron microscopy, *Mater. Sci. Eng. C.* 47 (2015) 357–366.  
<https://doi.org/10.1016/j.msec.2014.11.054>.
- [20] R. Cherif, A.E.A. Hamami, A. Aït-Mokhtar, Effects of leaching and chloride migration on the microstructure and pore solution of blended cement pastes during a migration test, *Constr. Build. Mater.* 240 (2020) 117934.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117934>.
- [21] T. Santos, M.I. Gomes, A.S. Silva, E. Ferraz, P. Faria, Comparison of mineralogical, mechanical and hygroscopic characteristic of earthen, gypsum and cement-based

- plasters, *Constr. Build. Mater.* 254 (2020) 119222.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119222>.
- [22] EN 12664, Performance thermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination de la résistance thermique par la méthode de la plaque chaude gardée et la méthode fluxmétrique - Produits secs et humides de moyenne et basse résistance thermique, 2001.
- [23] EN 12667, Performance thermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination de la résistance thermique par la méthode de la plaque chaude gardée et la méthode fluxmétrique - Produits de haute et moyenne résistance thermique,», 2001.
- [24] NF EN 821-3, Céramiques techniques avancées - Céramiques monolithiques - Propriétés thermophysiques - Partie 3 : détermination de la chaleur spécifique, Juin 2005, n.d.
- [25] ISO 12572, Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment, Détermination des propriétés de transmission de la vapeur d'eau, 2001.
- [26] ISO 12571, Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment, Détermination des propriétés de sorption hygroscopique, 2000.
- [27] proUmid, proUmid, (n.d.).
- [28] N. Issaadi, Effets de la variabilité des propriétés de matériaux cimentaires sur les transferts hygrothermiques : développement d ' une approche probabiliste, Thèse de doctorat, Université de La Rochelle, 2015.
- [29] C. Meyer, N. Egosi, C. Andela, Concrete with waste glass as aggregate, *J. Chem. Inf. Model.* 53 (2011) 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.
- [30] A. Zidol, M.T. Tognonvi, A. Tagnit-Hamou, Effect of Glass Powder on Concrete Sustainability, *New J. Glas. Ceram.* 07 (2017) 34–47.  
<https://doi.org/10.4236/njgc.2017.72004>.
- [31] R. Idir, M. Cyr, A. Tagnit-Hamou, Pozzolanic properties of fine and coarse color-mixed glass cullet, *Cem. Concr. Compos.* 33 (2011) 19–29.  
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.09.013>.

- [32] A. Shayan, A. Xu, Value-added utilisation of waste glass in concrete, *Cem. Concr. Res.* 34 (2004) 81–89. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00251-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00251-5).
- [33] O. Ozkan, I. Yuksel, Studies on mortars containing waste bottle glass and industrial by-products, *Constr. Build. Mater.* 22 (2008) 1288–1298. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.01.015>.
- [34] B. Taha, G. Nounu, Utilizing Waste Recycled Glass as Sand/Cement Replacement in Concrete, *J. Mater. Civ. Eng.* 21 (2009) 709–721. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2009\)21:12\(709\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2009)21:12(709)).
- [35] A.M. Matos, J. Sousa-Coutinho, Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement, *Constr. Build. Mater.* 36 (2012) 205–215. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.027>.
- [36] T.D. Dyer, R.K. Dhir, Chemical Reactions of Glass Cullet Used as Cement Component, *J. Mater. Civ. Eng.* 13 (2001) 412–417. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2001\)13:6\(412\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2001)13:6(412)).
- [37] G.M.S. Islam, M.H. Rahman, N. Kazi, Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice, *Int. J. Sustain. Built Environ.* 6 (2017) 37–44. <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2016.10.005>.
- [38] N. Issaadi, A.A. Hamami, R. Belarbi, A. Aït-Mokhtar, Experimental assessment of the spatial variability of porosity, permeability and sorption isotherms in an ordinary building concrete, *Heat Mass Transf. Und Stoffuebertragung.* 53 (2017) 3037–3048. <https://doi.org/10.1007/s00231-017-2041-4>.
- [39] A. Bouchikhi, M. Benzerzour, N. Abriak, W. Maherzi, Y. Mamindy-pajany, Study of the impact of waste glasses types on pozzolanic activity of cementitious matrix, *Constr. Build. Mater.* 197 (2019) 626–640. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.180>.
- [40] C. Gallé, Effect of drying on cement-based materials pore structure as identified by mercury intrusion porosimetry - A comparative study between oven-, vacuum-, and freeze-drying, *Cem. Concr. Res.* 31 (2001) 1467–1477. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00594-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00594-4).
- [41] M. Cheyrezy, V. Maret, L. Frouin, Microstructural analysis of RPC (Reactive Powder

- Concrete), *Cem. Concr. Res.* 25 (1995) 1491–1500. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00143-Z](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00143-Z).
- [42] J.C. Maso, *Interfacial Transition Zone in Concrete*, CRC Press, 1996. <https://doi.org/10.1201/9781482271560>.
- [43] M.M. Reda, N.G. Shrive, J.E. Gillott, Microstructural investigation of innovative UHPC, *Cem. Concr. Res.* 29 (1999) 323–329. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00225-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00225-7).
- [44] N.A. Soliman, A. Tagnit-Hamou, Development of ultra-high-performance concrete using glass powder – Towards ecofriendly concrete, *Constr. Build. Mater.* 125 (2016) 600–612. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.073>.
- [45] N. Issaadi, A. Nouviaire, R. Belarbi, A. Aït-Mokhtar, Moisture characterization of cementitious material properties: Assessment of water vapor sorption isotherm and permeability variation with ages, *Constr. Build. Mater.* 83 (2015) 237–247. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.030>.
- [46] A. Loukili, A. Khelidj, P. Richard, Hydration kinetics, change of relative humidity, and autogenous shrinkage of ultra-high-strength concrete, *Cem. Concr. Res.* 29 (1999) 577–584. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00022-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00022-8).
- [47] A. Hamami, *Vers une prédiction de la perméabilité au gaz à partir de la composition des matériaux cimentaires*, Thèse de Doctorat de l'Université de La Rochelle, 2009.
- [48] P. Mounanga, *Étude expérimentale du comportement de pâtes de ciment au très jeune âge : hydratation , retraits , propriétés thermophysiques*, Nantes, 2004.
- [49] C. Shi, Y. Wu, C. Riefler, H. Wang, Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders, 35 (2005) 987–993. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.015>.
- [50] M. Amar, M. Benzerzour, N. Abriak, Y. Mamindy-pajany, Study of the pozzolanic activity of a dredged sediment from Dunkirk harbour, *Powder Technol.* (2017). <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.07.055>.
- [51] M.Y. Ferroukhi, *Modélisation des transferts thermo-hydro-aérauliques dans les enveloppes de bâtiments : Evaluation des désordres causés par l'humidité*, université de La Rochelle, 2015.

- [52] Demirboğa R, Thermal conductivity and compressive strength of concrete incorporation with mineral admixtures, *Build. Environ.* 42 (2007) 2467–2471.
- [53] M.G. Gomes, L.M. Manga, A. Soares, J. De Brito, The influence of moisture content on the thermal conductivity of external thermal mortars, *Constr. Build. Mater.* 135 (2017) 279–286. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.166>.
- [54] Y. Xu, D.D.L. Chung, Cement of high specific heat and high thermal conductivity, obtained by using silane and silica fume as admixtures, *Cem. Concr. Res.* 30 (2000) 1175–1178. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00296-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00296-9).
- [55] A. Bouguerra, A. Ledhem, F. de Barquin, R.M. Dheilily, M. Quéneudec, Effect of microstructure on the mechanical and thermal properties of lightweight concrete prepared from clay, cement, and wood aggregates, *Cem. Concr. Res.* 28 (1998) 1179–1190. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00075-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00075-1).
- [56] S. Real, J.A. Bogas, M. da G. Gomes, B. Ferrer, Thermal conductivity of structural lightweight aggregate concrete, *Mag. Concr. Res.* 68 (2016) 798–808. <https://doi.org/10.1680/jmacr.15.00424>.
- [57] L.H. Nguyen, A.-L. Beaucour, S. Ortola, A. Noumowé, Experimental study on the thermal properties of lightweight aggregate concretes at different moisture contents and ambient temperatures, *Constr. Build. Mater.* 151 (2017) 720–731. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.087>.
- [58] U. Johnson Alengaram, B.A. Al Muhit, M.Z. bin Jumaat, M.L.Y. Jing, A comparison of the thermal conductivity of oil palm shell foamed concrete with conventional materials, *Mater. Des.* 51 (2013) 522–529. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.04.078>.
- [59] M.Y.J. Liu, U.J. Alengaram, M.Z. Jumaat, K.H. Mo, Evaluation of thermal conductivity, mechanical and transport properties of lightweight aggregate foamed geopolymer concrete, *Energy Build.* 72 (2014) 238–245. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.12.029>.
- [60] N. Ching, L. Kaw-Sai, Thermal conductivity of newspaper sandwiched aerated lightweight concrete panel, *Energy Build.* 42 (2010) 2452–2456. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.08.026>.

- 
- [61] A.A. Sayadi, J. V Tapia, T.R. Neitzert, G.C. Clifton, Effects of expanded polystyrene ( EPS ) particles on fire resistance , thermal conductivity and compressive strength of foamed concrete, *Constr. Build. Mater.* 112 (2016) 716–724.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.218>.
- [62] R. Demirboğa, R. Gül, Thermal conductivity and compressive strength of expanded perlite aggregate concrete with mineral admixtures, *Energy Build.* 35 (2003) 1155–1159. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2003.09.002>.
- [63] R. Demirboğa, Influence of mineral admixtures on thermal conductivity and compressive strength of mortar, *Energy Build.* 35 (2003) 189–192.  
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00052-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00052-X).
- [64] I. Asadi, P. Shafigh, Z.F. Bin, A. Hassan, N.B. Mahyuddin, Thermal conductivity of concrete - A review Reference, *J. Build. Eng.* (2018).  
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.07.002>.
- [65] R. Demirboga, A. Kan, Thermal conductivity and shrinkage properties of modified waste polystyrene aggregate concretes, *Constr. Build. Mater.* 35 (2012) 730–734.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.105>.
- [66] D.P. Bentz, M.A. Peltz, Thermal properties of high-volume fly ash mortars and concretes, (2011). <https://doi.org/10.1177/1744259110376613>.
- [67] T. Ishida, K. Maekawa, T. Kishi, Enhanced modeling of moisture equilibrium and transport in cementitious materials under arbitrary temperature and relative humidity history, 37 (2007) 565–578. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.11.015>.
- [68] C.M. Chen, F.F. Wangaard, Wettability and the hysteresis effect in the sorption of water vapor by wood, *Wood Sci. Technol.* 2 (1968) 177–178.

**CHAPITRE V. MODELISATION EXPERIMENTALE  
ET NUMERIQUE DE TRANSFERT DE MASSE ET DE  
CHALEUR : APPLICATION AUX ECO-BETONS**



## **V.1 Introduction**

Dans le domaine de génie civil, les matériaux de construction constituant l'enveloppe du bâtiment sont considérés comme des milieux poreux où plusieurs phénomènes de stockage, de transfert et d'échanges de chaleur et de masse se produisent. L'enveloppe du bâtiment est exposée aux différentes sollicitations et contraintes dynamiques de l'environnement extérieur (rayonnement, pluie, température, vent...) ainsi que ceux de l'environnement intérieur (chauffage, ventilation, différentes sources de chaleur et d'humidité...). Sous toutes ces contraintes, l'enveloppe est soumise à des phénomènes complexes de transfert de chaleur et de masse.

La modélisation numérique et la simulation sont un bon moyen pour étudier ou concevoir les enveloppes de bâtiment. La modélisation des transferts couplés de chaleur et d'humidité dans les enveloppes est basée sur plusieurs approches phénoménologiques qui se différencient principalement par les moteurs de transfert utilisés. Pour le transfert de chaleur, la température est désignée comme un moteur de transfert classique. En revanche, pour le transfert d'humidité, il n'y a pas d'unanimité. Il existe plusieurs modèles avec différents moteurs de transfert hydrique (teneur en eau, pression de vapeur, teneur en vapeur, humidité relative...). Dans le cadre de ce travail, nous avons développé un modèle numérique en se basant sur des formulations physiques utilisées et validées qu'on retrouve dans la littérature [1–8].

Dans la première partie, nous avons développé un nouveau dispositif constitué de deux compartiments, le premier simulant l'environnement extérieur et le deuxième simulant l'ambiance habitable. L'apport de ce dispositif est de prendre en considération les différentes sollicitations climatiques existantes dans la nature notamment l'ensoleillement, les précipitations et les changements de température et d'humidité. Plusieurs recherches récentes ont étudié l'effet de la pluie ou de l'ensoleillement à l'échelle du bâtiment pour qualifier la qualité de revêtement de façades [9–15]. Ces études sont réalisées sur site en conditions climatiques réelles ce qui offre l'avantage d'étudier l'enveloppe en exploitation. Néanmoins, dans ces conditions l'analyse des mécanismes de transfert devient difficile et c'est principalement pour cette raison qu'on a opté pour le développement d'un banc expérimental en conditions maîtrisées de laboratoire. Cela permet entre autres de prévoir des séquences de sollicitations qui facilitent l'analyse des mécanismes de transfert hygrothermique. Des études

ont développé des bancs expérimentaux en conditions de laboratoire maîtrisées [16–19]. Ces derniers ne permettent pas d'envisager des sollicitations en rayonnement/précipitation.

Dans la deuxième partie, nous identifions les paramètres de transfert hydrique à savoir la perméabilité à la vapeur d'eau, la perméabilité à l'eau liquide et la capacité de stockage/déstockage d'humidité, moyennant une procédure d'identification. Cette dernière est basée sur la minimisation de la fonction d'erreur entre les valeurs expérimentales de l'humidité relative obtenues à partir d'un essai d'absorption et ceux numériques obtenues en résolvant l'équation couplée non linéaire de transfert d'humidité. Nous présentons également ce test d'absorption qui consiste à immerger un échantillon préalablement séché et soumis à un écoulement liquide unidirectionnel dans des conditions isothermes. Cette partie vient en complément de la caractérisation effectuée dans le chapitre précédent et vise à proposer une alternative aux méthodes standard de caractérisation.

Dans la troisième et dernière partie, nous avons programmé deux sollicitations hygrothermiques pour aboutir à une validation du modèle de prédiction. La première sollicitation est de type échelon portant uniquement sur la température et l'humidité. La deuxième consiste à faire varier la température de façon sinusoïdale d'une période de 24h sur une durée de 8 jours. Ces sollicitations hygrothermiques sont accompagnées de radiations solaires et de précipitations appliquées sur une période de 1h de façon espacée alternée.

## **V.2 La mise en place de la plateforme expérimentale**

Dans cette partie nous décrivons les différentes étapes entreprises pour la mise en place de la nouvelle plateforme expérimentale dédiée à l'étude du comportement hygrothermique à l'échelle de la paroi de bâtiment (cf. Figure V- 1).

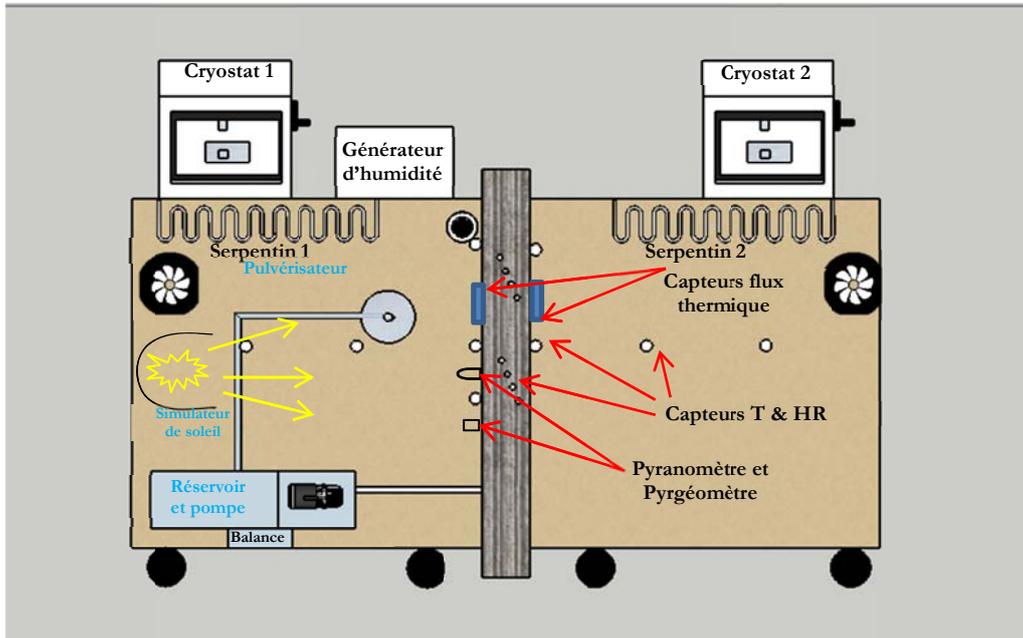


Figure V- 1 : Banc expérimental développé

### V.2.1 Description du banc

Le banc développé est constitué de deux compartiments cubiques de 1.22 m de côté. Ils sont constitués de panneaux contreplaqués de 10 mm d'épaisseur et d'une isolation intérieure de 5 cm en polystyrène extrudé. L'isolation hydrique est assurée par des panneaux en PVC (cf. Figure V- 2).



Figure V- 2 : Le caisson construit de 1,20m x 1,20m x 1 ,20m

### V.2.2 La mise en œuvre de la paroi

La paroi monocouche étudiée de dimension 1,25 x 1,35 x 0.11 m<sup>3</sup>, est présentée sur la Figure V- 3. Il s'agit de l'éco-béton avec une substitution de 20% de ciment par la poudre de verre. La formulation du béton est présentée dans le chapitre précédent (Chapitre 4-Tableau 3) désigné sous le nom de 20G-I. La paroi a été réalisée en coulant l'éco-béton en trois couches dans un environnement de 22°C et de 60% d'humidité relative, tout en procédant à la vibration à l'aide d'une aiguille vibrante dans le but d'éliminer l'effet de la ségrégation et d'homogénéiser toutes les propriétés. Par la suite, la paroi a été décoffrée après 24h de cure et conditionnée dans le même climat précédent.



Figure V- 3 : La mise en œuvre de la paroi. (a) le coffrage, (b) le coulage, (c) la paroi après décoffrage.

Après décoffrage, l'échantillon nécessite 4 étapes avant de lancer les tests qui sont :

- Installation du pare-vapeur représenté par un ruban adhésif en aluminium et de la laine de roche sur les côtés latéraux de la paroi (isolation hydrique et thermique) ;
- Perçage de la paroi à plusieurs profondeurs ;
- Introduction des capteurs dans la paroi puis colmater les contours des passages des câbles dans la paroi en utilisant de la silicone et de polyéthylène bien entouré par un ruban adhésif ;
- Installation du banc expérimental et le pré-conditionnement de la paroi.

### **V.2.3 Régulation en Température T et humidité relative HR**

Les deux caissons sont régulés en température par le biais de cryostats Huber de type CC-K6 offrant des puissances de chauffage et de refroidissement de 2 kW et de 0,15 kW respectivement (cf. Figure V- 4). Les deux cryostats sont reliés à une canalisation en cuivre de 20 m de longueur façonnée en serpentín et installée à l'intérieur du caisson sur la face supérieure de sorte à faire office d'échangeur de chaleur. Une ventilation est installée dans le but de brasser l'air à l'intérieur des caissons. Ces derniers sont équipés des capteurs permettant la régulation et le contrôle de la température et de l'humidité relative. Le premier caisson est équipé également d'un arroseur relié avec un temporisateur simulant la pluie ainsi qu'un projecteur simulant l'ensoleillement. Le deuxième compartiment simule l'ambiance habitable. La paroi est placée entre les deux compartiments. Cette dernière comporte des capteurs d'humidité et de température localisés sur les surfaces extérieure et intérieure et en volume comme montré sur la Figure V- 4. Enfin, des capteurs de température sont placés dans les deux compartiments à plusieurs hauteurs pour vérifier les conditions aux limites.



Figure V- 4 : L'ensemble du banc expérimental

#### V.2.4 Simulateur de pluie

Un système de pulvérisation est adopté afin de simuler la précipitation. Il est constitué de deux arroseurs reliés à une pompe avec un débit de 500 l/h ce qui correspond à un niveau de précipitation de 500 mm/h. La pompe est immergée dans un réservoir étanche et posé sur une balance Kern® DS 16K0.1 de 16 kg de portée et de 0.1 g de précision. Cette dernière est reliée à un ordinateur pour l'acquisition moyennant le logiciel Simple Data Logger (SDL). L'alimentation de ce système est commandée par une minuterie permettant de réguler le temps et la durée de la pluie (cf. Figure V- 5).



Figure V- 5 : L'installation de simulateur de pluie

### V.2.5 Simulateur d'ensoleillement

Deux projecteurs Langlois® avec une puissance électrique de 500 W chacun sont installés permettant de simuler le rayonnement solaire (cf. Figure V- 6). Le tout est relié à un variateur de puissance électrique permettant de varier la luminosité afin de pouvoir simuler des périodes ensoleillées variant de 0 à 1000 W/m<sup>2</sup> (périodes hivernale et estivale).

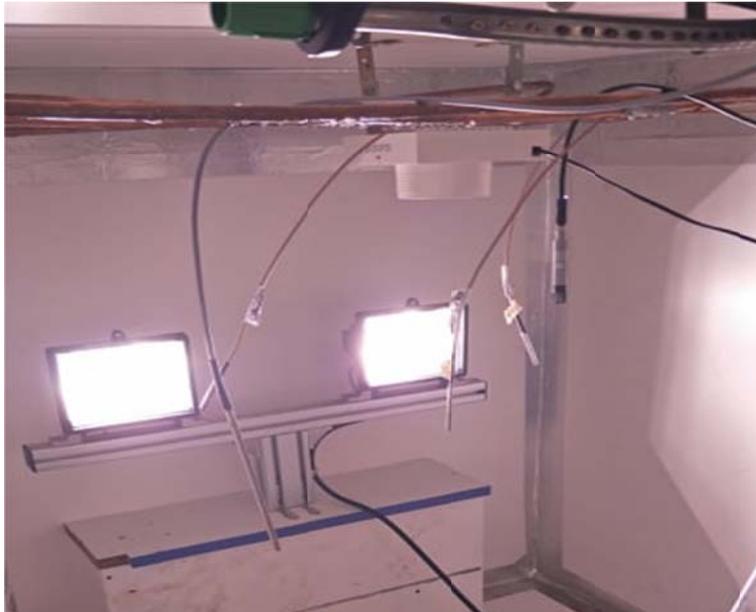


Figure V- 6: L'installation de simulateur du soleil

Des pyranomètre et pyrgéomètre Kipp & Zonen® sont installés pour la mesure des rayonnements Courtes Longueurs d'Onde (CLO) et Grandes Longueurs d'Onde (GLO). L'acquisition de ces mesures se fait par l'intermédiaire d'une centrale d'acquisition Almémo de chez AHLBORN (cf. Figure V- 7).



Figure V- 7 : La disposition des capteurs d'éclairage CLO & GLO (Pyranomètre et Pyrgéomètre)

### V.2.6 Autres capteurs et acquisition associée

Les capteurs de mesure de température « T » et d'humidité relative « Hr » AHLBORN FHA 646 R utilisés sont de type thermistance pour T et capacitif pour Hr (cf. Figure V- 8). L'avantage de ces capteurs est leur petite taille et la fiabilité des mesures. Ils permettent la mesure de T et de Hr dans les deux caissons (cf. Figure V- 12), aux différentes positions au sein de la paroi et aux bords extérieurs et intérieurs de la paroi comme illustrée sur la Figure V- 9 et la Figure V- 10. Des capteurs espacés de 2 cm sont installés en profondeur dans 4 zones différentes (cf. Figure V- 8). Tous les capteurs sont étalonnés au préalable par le fournisseur. Ils sont reliés à une centrale d'acquisition des données de type ALMEMO. Cette dernière permet d'enregistrer les données toutes les minutes. Les caractéristiques des capteurs sont présentées dans le Tableau V- 1.

| Caractéristiques techniques |             |
|-----------------------------|-------------|
| Précision Hr                | $\pm 3\%$   |
| Précision T                 | 0.3 °C      |
| Résolution maximale         | 10s         |
| Plage de mesure Hr          | 0 à 100% Hr |
| Plage de mesure T           | -20 à 100°C |

Tableau V- 1: Les caractéristiques techniques des capteurs hygrothermiques AHLBORN FHA 646 R



Figure V- 8 : Le capteur AHLBORN FHA 646 R

Des fluxmètres thermiques sont ainsi étalonnés par le fournisseur et sont collés en diagonale sur les deux côtés de la paroi dans le but de mesurer le flux thermique (cf. Figure V-9), ces

derniers sont reliés à une centrale d'acquisition Campbell Scientific. La fréquence de mesure est la même.

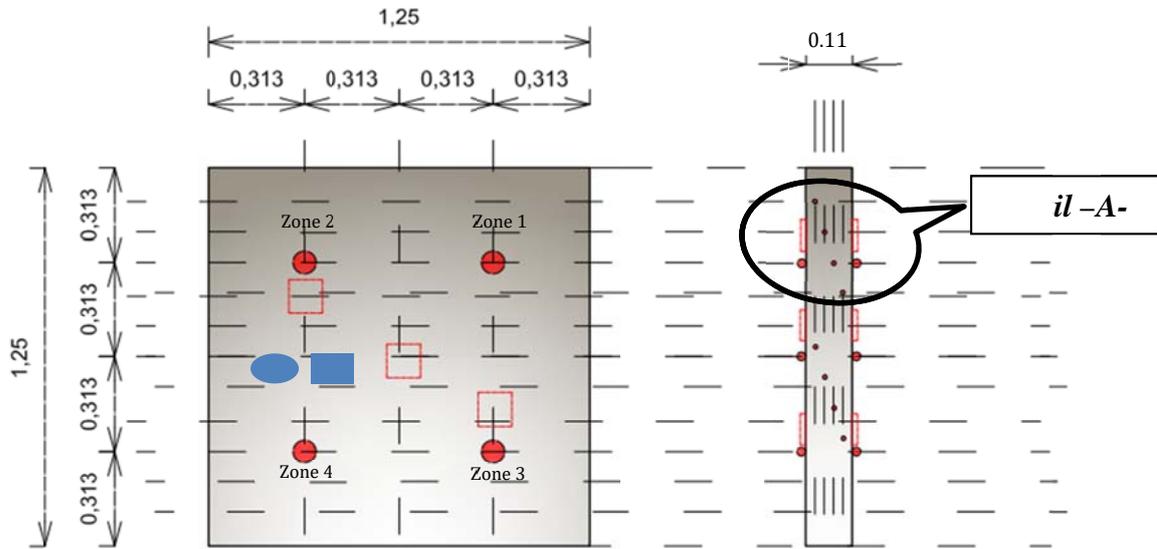


Figure V- 9: Position des capteurs sur les surfaces et au cœur de la paroi (à gauche surface extérieure, à droite vue en coupe)

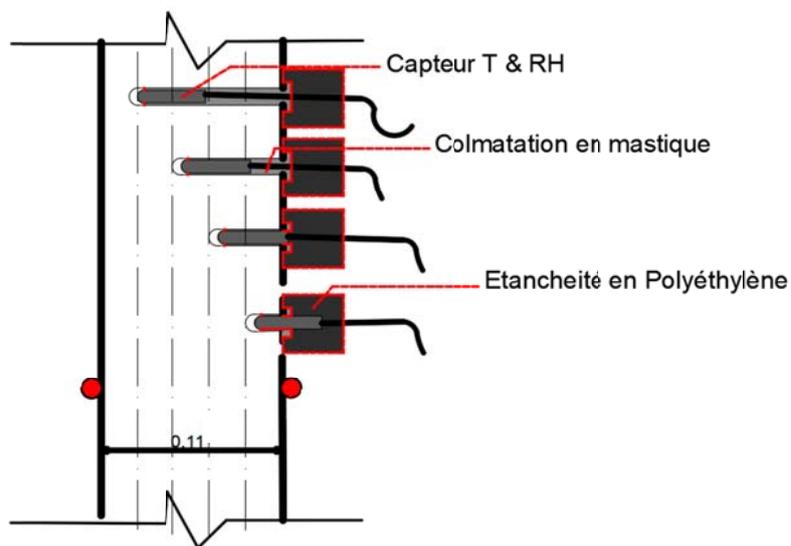


Figure V- 10 : Détail du positionnement des capteurs en profil de la paroi (Détail A)



Figure V- 11 : La disposition des capteurs T&HR et Capteurs de flux thermique

### V.2.7 Qualification du banc

Afin de qualifier la capacité de régulation en température du banc, nous avons tout d'abord pré-conditionné les deux compartiments à une température de 25°C pendant une journée. Après cela, nous avons programmé un créneau de changement de température appliqué dans le premier compartiment nommé « Ext », représenté en une répétition d'un saut de température variant de 20 à 10 °C. Chaque palier de température a pour une durée d'une journée. Le deuxième compartiment « Int » est régulé à 25 °C. Ces conditions aux bords sont données par la Figure V- 13. Le suivi de température dans les deux compartiments est établi suivant la disposition des capteurs T et Hr nommés Ext<sub>i</sub> et Int<sub>i</sub> illustrée sur Figure V- 12 à savoir à différentes hauteurs 20, 40 et 60 cm.



Figure V- 12 : disposition des capteurs dans la cellule

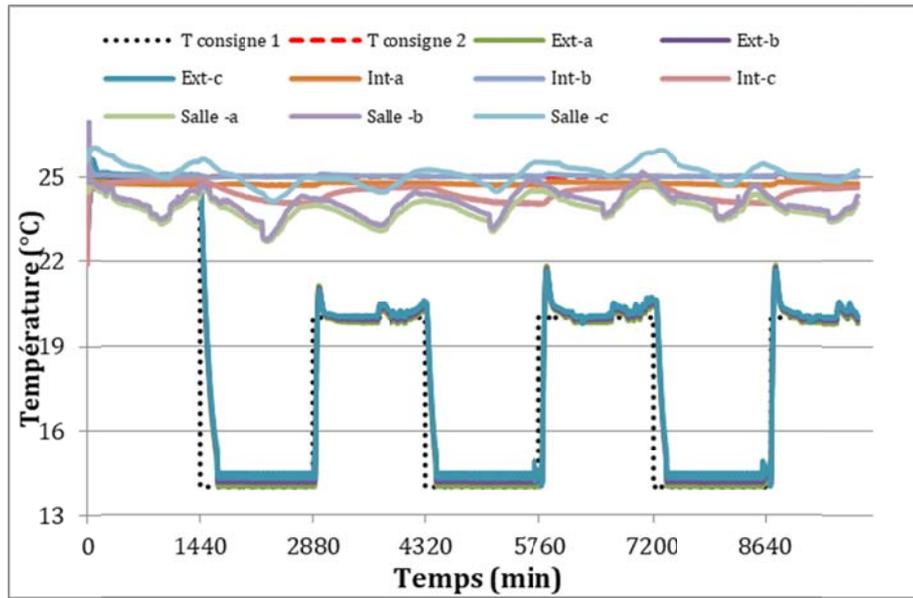


Figure V- 13 : L'évolution de la température dans la salle et à l'intérieur des deux caissons  
 D'après la Figure V- 13 , Nous remarquons que l'environnement de la salle n'affecte pas les températures demandées dans les deux caissons et ceci traduit une assez bonne régulation de la température dans les caissons.

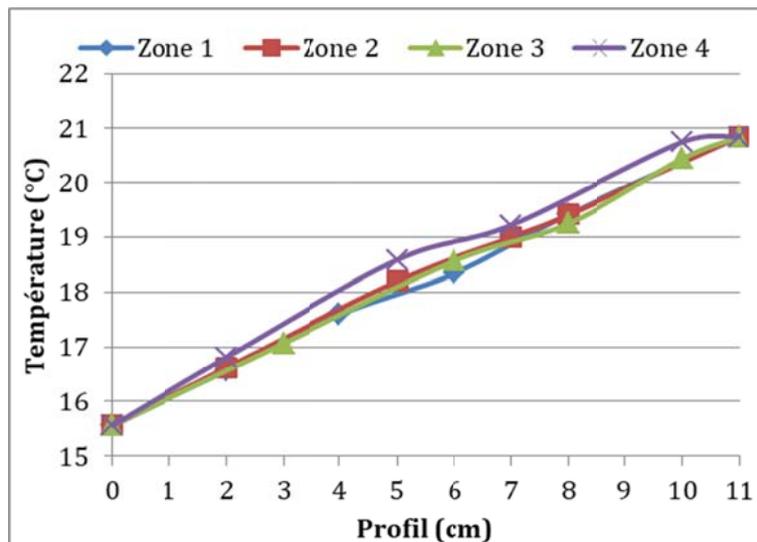


Figure V- 14 : Le profil de température au sein de la paroi en régime stationnaire  
 Le profil de température à plusieurs zones est présenté sur la Figure V- 14 en régime stationnaire (à  $t=2900\text{min}$ ). Les trois premières zones montrent un profil linéaire comparable et différent de celui de la zone 4. Ce dernier ne possède pas d'une isolation comme c'est le cas pour les 3 premiers (cf. Figure V- 9) et traduit la présence de ponts thermiques affectant la mesure pour la zone 4. La comparaison entreprise ne conforte dans la qualité des mesures pour 3 premières zones. Les capteurs de la zone 4 ne seront pas utilisés dans la suite de

l'analyse. Afin de quantifier cette fois l'homogénéité de l'ensoleillement sur la paroi, nous avons fait des tests d'ensoleillement sur la paroi à plusieurs distances «  $d$  » entre les lampes et la paroi à tester. Les résultats des réponses des pyranomètres et pyrgéomètres sont illustrés dans la Figure V- 15 ci-dessus montrant les éclairagements CLO/GLO sur la paroi. Plus les lampes sont installées près de la paroi plus le flux radiatif est maximum est concentré. Il peut aller jusqu'à environ  $1000\text{W/m}^2$ . Par la suite, nous avons fixé la distance entre les lampes et la paroi à 60 cm. Cette position permet d'atteindre l'éclairage maximal avec une homogénéité acceptable.

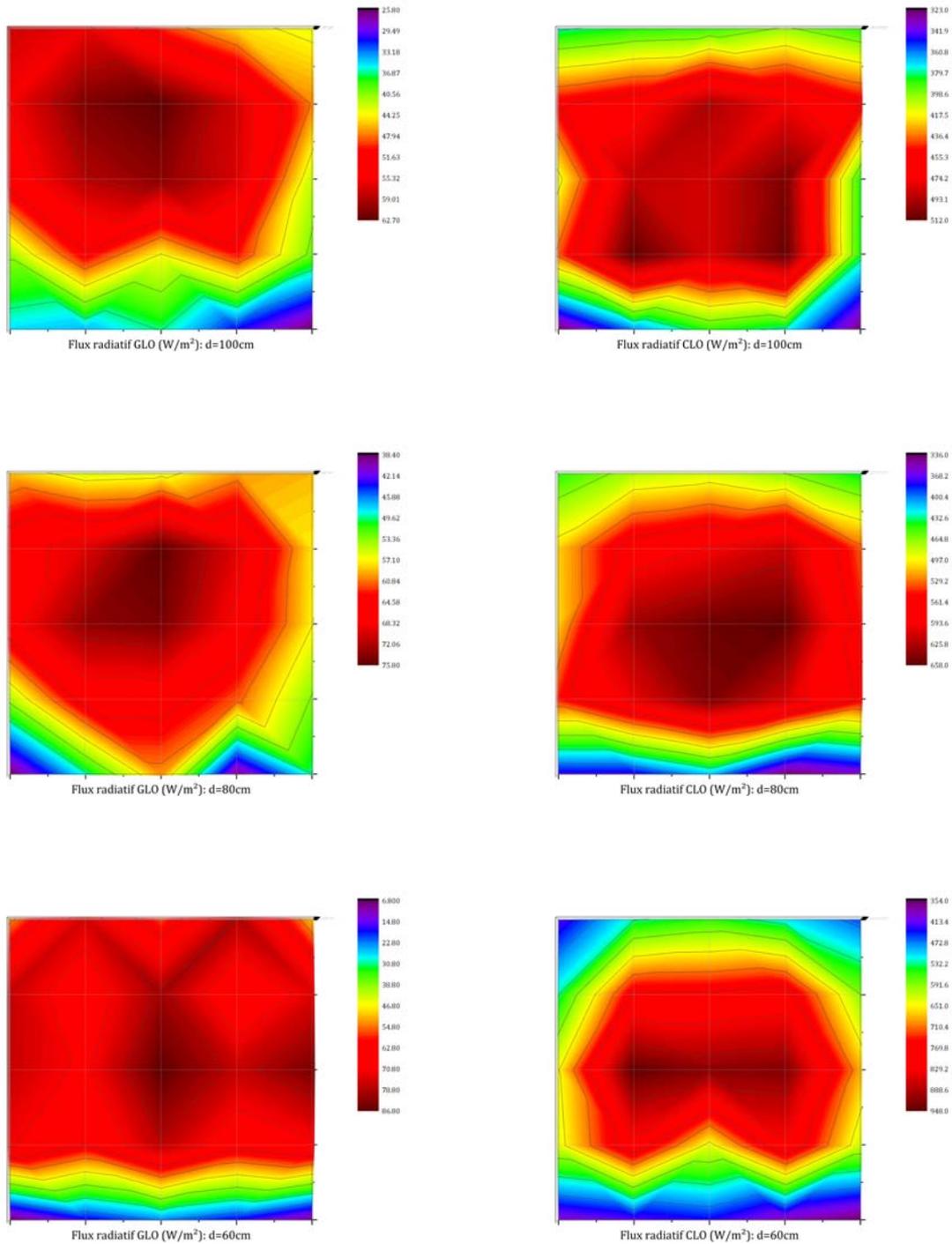


Figure V- 15: Cartographie des flux radiatifs CLO & GLO sur une maille de 5 X 5

### V.3 Modèle mathématique de transfert de masse et de chaleur dans les milieux poreux

Le développement des modèles macroscopiques des transferts couplés de chaleur et d'humidité pour la prédiction des comportements des matériaux poreux a suscité l'intérêt de plusieurs chercheurs. Dans cette partie, nous allons proposer un modèle mathématique basé sur la théorie de Luikov [20] pour la prédiction du comportement hygrothermique de la paroi

de bâtiments exposée à la pluie. Le modèle développé prend la température et la pression de vapeur comme des moteurs de transfert. Tous ces paramètres d'entrées (conductivité thermique  $\lambda$ , chaleur spécifique  $C_p$ , masse volumique  $\rho$ , isotherme de sorption  $C_m(\varphi)$  et perméabilité à la vapeur d'eau  $\delta p$ ) sont caractérisés dans le chapitre précédent. La diffusivité hydrique  $D_w$  est proposé dans la littérature et est fonction de la perméabilité d'eau liquide et la perméabilité à la vapeur d'eau. La campagne de mesure qui a été réalisée et présentée dans le chapitre précédent est indispensable. Néanmoins, bien que les méthodes utilisées aient fait leur preuve, elles présentent l'inconvénient d'être chronophage. Nous proposons d'évaluer la diffusivité hydrique ainsi que les autres paramètres de transfert d'humidité avec une méthode alternative isotherme à partir de l'essai d'absorption.

### V.3.1 Formulation mathématique

Le transfert d'humidité dans un milieu poreux s'effectue par diffusion de vapeur d'eau et par capillarité. Le transfert de chaleur s'effectue par conduction advection [21]. Le modèle développé est constitué de deux équations de bilan de chaleur et d'humidité et s'appuie sur les hypothèses ci-dessous afin de simplifier quelques phénomènes :

- La phase solide est considérée homogène, isotrope et non réactive (l'hydratation de la matrice cimentaire est supposée achevée donc les termes puits dus aux réactions chimiques sont négligés) ;
- La phase liquide est supposée constituée de l'eau pure;
- La phase gazeuse constituée de l'air sec et de vapeur d'eau, obéit à la loi des gaz parfaits ;
- Les transferts de chaleur par rayonnement volumique n'est pas pris en compte contrairement au rayonnement surfacique
- Le changement d'état de l'humidité de la phase liquide ou gazeuse à un état solide ou le contraire n'est pas considéré dans ce modèle (phénomène de gel/dégel) ;
- Le transfert de l'humidité sous l'effet de la gravité est négligeable.

### V.3.2 Bilan massique

L'équation 1 représente l'équation de conservation de masse [22] :

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\bar{\nabla} \cdot (\bar{j}_v + \bar{j}_l) \text{ Eq. 1}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\bar{\nabla} \cdot \left( -\delta_p \bar{\nabla} P_v - k_l \bar{\nabla} P_c \right) \text{Eq. 2}$$

En introduisant la pente de l'isotherme dans l'équation du bilan massique, on obtient :

$$\frac{C_m \rho_s}{P_{v,sat}} \frac{\partial P_v}{\partial t} = -\bar{\nabla} \cdot \left( -\delta_p \bar{\nabla} P_v - k_l \bar{\nabla} P_c \right) \text{Eq. 3}$$

En considérant l'hypothèse d'un équilibre thermodynamique local au niveau de pore entre les deux phases (vapeur et liquide), la loi de Kelvin est bien applicable (Eq.4).

$$P_c = \frac{\rho_l RT}{M} \ln \left( \frac{P_v}{P_{v,sat}} \right) \text{Eq. 4}$$

Où :  $\rho_l$  [kg/m<sup>3</sup>] est la masse volumique de l'eau en état liquide, R [J/(mol·K)] est la constante de gaz parfait, T [K] est la température et M [kg/mol] est la masse molaire.

De plus, on sait que l'humidité relative (RH) peut être décrite avec l'équation suivante (Eq.5):

$$RH = \frac{P_v}{P_{v,sat}} \text{Eq. 5}$$

Pour la détermination de  $\bar{\nabla} P_c$  on doit dériver l'équation 4 pour transformer le gradient de pression capillaire en une combinaison de gradient de pression de vapeur d'eau et un gradient de température, on obtient :

$$\bar{\nabla} P_c = \frac{\rho_l R}{M} \ln \left( \frac{P_v}{P_{v,sat}} \right) \bar{\nabla} T + \frac{\rho_l RT}{M} \frac{\partial \ln \left( \frac{P_v}{P_{v,sat}} \right)}{\partial T} \bar{\nabla} T + \frac{\rho_l RT}{MP_v} \bar{\nabla} P_v \text{Eq. 6}$$

L'équation de transfert de masse s'écrit comme suit (Eq7.) :

$$\frac{C_m \rho_s}{P_{v,sat}} \frac{\partial P_v}{\partial t} = \bar{\nabla} \cdot \left( K_{PP} \bar{\nabla} P_v + K_{PT} \bar{\nabla} T \right) \text{Eq. 7}$$

Tels que :

$$K_{pp} = \left( \delta_p + k_l \frac{\rho_l RT}{MP_v} \right) \text{Eq. 8}$$

$$K_{pT} = k_l \left( \frac{\rho_l R}{M} \ln \left( \frac{P_v}{P_{v,sat}} \right) + \frac{\rho_l RT}{M} \frac{\partial \ln \left( \frac{P_v}{P_{v,sat}} \right)}{\partial T} \right) \text{Eq. 9}$$

### V.3.3 Bilan énergétique

Le transfert de chaleur dans les matériaux poreux humide est régi par l'équation de conservation d'énergie (Eq.10) avec comme phénomènes mis en jeu le transfert de chaleur par conduction dans les phases solide et liquide régis par la loi de Fourier [21], un transfert convectif dans les phases liquides et gazeuses et enfin du changement de phase liquide-gaz [23].

$$C_p \rho_s \frac{\partial T}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot (\vec{j}_q) \text{ Eq. 10}$$

Le flux de chaleur s'écrit comme suit [24] (Eq.11):

$$\vec{j}_q = -\lambda \vec{\nabla} T + h_l (\vec{j}_l + \vec{j}_v) + L_v \vec{j}_v \text{ Eq. 11}$$

L'équation de transfert de chaleur sera (Eq.12):

$$C_p \rho_s \frac{\partial T}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot \left( -\lambda \vec{\nabla} T - h_l (k_l \vec{\nabla} P_c + \delta_p \vec{\nabla} P_v) \right) + L_v \sigma C_m \frac{\partial P_v}{\partial t} \text{Eq. 12}$$

En regroupant les valeurs en termes de la température et de la pression de vapeur, on aura (Eq.13):

$$C_p \rho_s \frac{\partial T}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot \left( K_{TT} \vec{\nabla} T + K_{TP} \vec{\nabla} P_v \right) + L_v \sigma C_m \frac{\partial P_v}{\partial t} \text{Eq. 13}$$

Tels que :

$$K_{TT} = \left( \lambda + h_l k_l \frac{\rho_l R}{M} \ln \left( \frac{P_v}{P_{v,sat}} \right) + h_l k_l \frac{\rho_l RT}{M} \frac{\partial \ln \left( \frac{P_v}{P_{v,sat}} \right)}{\partial T} \right) \text{Eq. 14}$$

$$K_{TP} = \left( h_l \delta_p + k_l h_l \frac{\rho_l RT}{MP_v} \right) \text{Eq. 15}$$

Les deux équations de transfert de masse et de chaleur peuvent s'écrire sous forme condensée comme suit (Eq.16):

$$\rho_s \begin{bmatrix} C_m & 0 \\ 0 & C_p \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial P_v}{\partial t} \\ \frac{\partial T}{\partial t} \end{Bmatrix} = \nabla \begin{bmatrix} K_{PP} & K_{PT} \\ K_{TP} & K_{TT} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \nabla P_v \\ \nabla T \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ L_v \sigma C_m \frac{\partial P_v}{\partial t} \end{Bmatrix} \text{Eq. 16}$$

### V.3.4 Les conditions aux limites

Pour ce modèle, nous allons opter pour des conditions aux limites de type flux comme suit

$$\overline{J_{v,ext}} = h_{m,ext} \left( \varphi_{ext} P_{v,sat,ext} - \varphi_{surf,ext} P_{v,sat,surf,ext} \right) + I_{Rain} \text{Eq. 17}$$

$$\overline{J_{q,ext}} = h_{c,ext} \left( T_{ext} - T_{surf,ext} \right) + (1 - \sigma) L_v h_{m,ext} \left( \varphi_{ext} P_{v,sat,ext} - \varphi_{surf,ext} P_{v,sat,surf,ext} \right) + S_e \text{Eq. 18}$$

$$\overline{J_{v,int}} = h_{m,int} \left( \varphi_{int} P_{v,sat,int} - \varphi_{surf,int} P_{v,sat,surf,int} \right) \text{Eq. 19}$$

$$\overline{J_{q,int}} = h_{c,int} \left( T_{int} - T_{surf,int} \right) + (1 - \sigma) L_v h_{m,int} \left( \varphi_{int} P_{v,sat,int} - \varphi_{surf,int} P_{v,sat,surf,int} \right) \text{Eq. 20}$$

Tels que :

$I_{rain}$  représente le flux liquide de la pluie infiltrée dans la paroi;

$S_e$  représente le flux radiatif reçu par la paroi. Il est défini comme suit :

$$S_e = \alpha_{CLO} E_{CLO} + \alpha_{GLO} E_{GLO}$$

Où  $E_{CLO}$  et  $E_{GLO}$  représentent les éclairagements de courte et de grande longueur d'onde respectivement, et  $\alpha$  représentent les coefficients d'absorption CLO et GLO. Ces derniers sont obtenues apr calibration sur l'essai .

### V.3.5 Résolution numérique

La simulation numérique des transferts fortement couplés de masse et de chaleur est réalisée par le modèle de prédiction représenté par le système d'équations aux dérivées partielles (système d'Eq. 16). Elle nécessite un environnement de résolution très puissant permettant le traitement des problèmes multi-physiques où plusieurs phénomènes sont étudiés simultanément. Par conséquent, nous avons eu recours au code de calcul Comsol Multiphysics<sup>®</sup> basé sur la méthode des éléments finis qui est largement utilisé dans la communauté scientifique, en particulier pour le problème multi-physique qui nous concerne.

### V.3.6 Paramètres d'entrée du modèle

La résolution du modèle des transferts de masse et de chaleur nécessite des paramètres d'entrée fiable. Ils sont caractérisés finement dans le chapitre précédent (Chapitre 4). Seules les propriétés thermiques de ce chapitre ont été considérées et sont regroupées dans le Tableau V-2.

|                                     |                        |
|-------------------------------------|------------------------|
| La conductivité thermique $\lambda$ | 1290 mW/m.K            |
| La chaleur spécifique $C_p$         | 850 J/kg.K             |
| Le poids volumique $\rho_s$         | 2290 kg/m <sup>3</sup> |

Tableau V- 2 : les propriétés du matériau étudié

En ce qui concerne les propriétés de transfert hydrique, nous avons développé une méthode d'identification présentée ci-après. En plus de la perméabilité liquide, cette dernière permet de caractériser ces paramètres en fonction de l'état hydrique du matériau y compris pour la perméabilité à la vapeur. Pour rappel, la caractérisation de la perméabilité à la vapeur a porté uniquement sur un état hydrique correspondant à la coupelle humide.

### V.4 Identification des propriétés de transfert hydrique via la méthode inverse

Contrairement aux propriétés thermiques telles que la conductivité thermique et la chaleur spécifique, la caractérisation des propriétés de transfert hydrique prend énormément de temps pouvant aller de 2 à 4 mois pour les isothermes de sorption et de 15 à 30 jours pour la perméabilité à la vapeur d'eau. Dans cette partie, nous proposons une méthode alternative aux méthodes expérimentales normalisées. Permettant de caractériser ces trois paramètres matériels moyennant une procédure d'identification, elle consiste à effectuer une mesure simultanée de l'évolution de l'humidité relative due au processus d'imbibition. Ce dispositif expérimental est couplé à un outil d'identification développé capable de traiter plusieurs paramètres d'identification avec une fonctionnelle de minimisation. Le modèle numérique est basé sur un modèle de type diffusion non linéaire avec un coefficient de diffusion d'humidité fonction de la perméabilité à l'eau liquide et la vapeur d'eau.

#### V.4.1 Modèle numérique

Dans le cas isotherme, le système n° 16 se résume à l'équation ci-dessous :

$$C_m(RH) \cdot \rho_s \frac{\partial RH}{\partial t} = \nabla \cdot \left( \left( \underbrace{k_v(RH) P_{v,sat}}_{K_v(RH)} + \underbrace{k_l(RH) \frac{\rho_l RT}{RH \cdot M_{H_2O}}}_{K_l(RH)} \right) \nabla RH \right) \text{ Eq. 21}$$

Où  $C_m(RH)$  traduit la capacité de stockage de l'humidité,  $K_v(RH)$  et  $K_l(RH)$  sont respectivement le coefficient de conductivité de la vapeur et du liquide.

#### V.4.2 Matériel et méthodes expérimentales

Dans cette section nous décrivons la procédure utilisée, les échantillons pour cette étude sont bien isolés et scellés sauf les faces supérieure et inférieure en contact avec l'eau. Cette condition est obtenue en plaçant les échantillons dans le dispositif de mesure du coefficient d'absorption capillaire tout en assurant le niveau d'eau fixe.

Les capteurs d'humidité relative de type FHA 646 R d'AHLBORN sont compacts et extrêmement petits. L'avantage de ces capteurs est la petite taille et la fiabilité de la mesure (cf. Tableau V-1). Tous les capteurs sont connectés à une centrale électrique AHLBORN ALMEMO 5690-2, permettant le suivi et l'enregistrement de l'humidité relative, le tout est représenté dans le schéma suivant de la Figure V- 16.

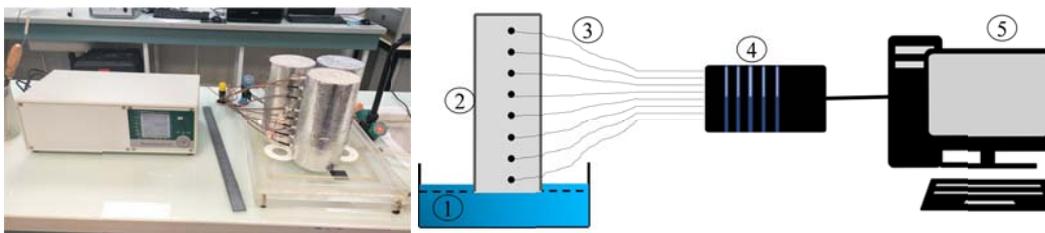


Figure V- 16: Le banc expérimental

Eau; 2- Echantillon à tester; 3- Capteurs; 4- Central d'acquisition; 5- Ordinateur pour le poste traitement.

#### V.4.3 Résolution numérique du problème direct

Pour résoudre l'équation différentielle non linéaire (Eq.21), la méthode des différences finies a été retenue selon les étapes ci-dessous.

### V.4.3.1 Formulation adimensionnelle

Pour poursuivre l'analyse numérique et afin d'éviter d'éventuels problèmes numériques liés à une plage de variation trop importante entre les paramètres à identifier, le problème physique est adimensionné. Pour cela, un changement de variable en temps et en espace a été réalisé comme suit :

$$x = x^* \cdot X ; t = t^* \cdot T \text{ Eq. 22}$$

La capacité de stockage de l'humidité, les conductivités de la vapeur et du liquide ont été adimensionnées également :

$$C_m = C_m^* \cdot C_m^{\max} ; \rho_s = \rho_s^* \cdot \rho_s^{\max} ; K_l = K_l^* \cdot K_l^{\max} ; K_v = K_v^* \cdot K_v^{\max} ; K_l^{\max} = K_v^{\max} = K^{\max} \text{ Eq. 23}$$

Les variables avec un Astérix (\*) correspondent aux variables adimensionnées ; X et T sont respectivement la longueur de l'échantillon et le temps expérimental de diffusion. Les coefficients avec Astérix (max) sont les valeurs maximales estimées que les variables associées peuvent atteindre.

Par la suite, la résolution numérique est appliquée à l'équation sans dimension suivante :

$$C_m^* (RH^j) \rho_s^* \frac{\partial RH}{\partial t^*} = Ad^* \nabla \left( (K_l^* (RH^j) + K_v^* (RH^j)) \nabla RH^{j+1} \right) \text{ Eq. 24}$$

Où que le coefficient adimensionnel est donné par :

$$Ad^* = \frac{T}{\rho_s^{\max} X^2} \frac{K^{\max}}{Cm^{\max}} \text{ Eq. 25}$$

De plus, l'équation sera discrétisée en temps puis en espace dans l'objectif de simplifier les notations.

### V.4.3.2 Discrétisation temporelle

La solution de l'équation est recherchée sur des points discrets de l'espace-temps ([0,1]). Dans notre cas, le maillage temporel sera adaptatif afin de poursuivre la variation de l'évolution temporelle. Nous allons opter pour un schéma semi-implicite où les termes non linéaires sont traités au pas de temps j et la variable d'état RH au pas de temps j+1. Cela va nous permettre de maintenir la stabilité du schéma. L'équation 24 devient :

$$C_m^* (RH^j) \rho_s^* \frac{RH^{j+1} - RH^j}{\Delta t^*} = Ad^* \nabla \left( (K_l^* (RH^j) + K_v^* (RH^j)) \nabla RH^{j+1} \right) \text{ Eq. 26}$$

Afin de résoudre l'équation, nous utilisons la méthode du point fixe pour trouver  $RH^{j+1}$

$$RH^{j+1} = -\frac{\Delta t^* Ad^*}{C_m^* (RH^j) \rho_s^*} \nabla \left( (K_l^* + K_v^*) \nabla RH^{j+1} \right) + RH^j \quad \text{Eq. 27}$$

$$F(U) = U$$

On rappelle que pour résoudre un problème d'un point fixe

On procède à construire une suite  $(U_k)_{k \in \mathbb{N}}$  de telle sorte que  $U_{k+1} = F(U_k)$

Le choix initiale dans notre problème sera  $U_0 = RH^j$  et donc  $RH_{k+1}^{j+1} = F(RH_k^{j+1})$

Pour arrêter le calcul, nous fixons un critère d'arrêt donné par l'équation 31 tel que  $\varepsilon$  est de l'ordre de  $1e-6$ .

#### V.4.3.3 Discrétisation spatiale

Dans notre cas, la diffusion est supposée unidirectionnelle. La géométrie est représentée par un intervalle entre 0 et 1 discrétisé uniformément en un maillage comprenant  $N+1$ . Le schéma de discrétisation spatial retenu est le schéma uniforme centré. Les opérateurs continus dans l'équation 26 sont détaillés ci-dessous :

$$\left( \frac{\partial RH^j}{\partial x^*} \right)_i \simeq \frac{RH_{i+1}^j - RH_{i-1}^j}{2\Delta x^*}; \left( \frac{\partial RH^j}{\partial x^*} \right)_i \simeq -\frac{RH_{i-1}^j - RH_i^j}{\Delta x^*}; \left( \frac{\partial RH^j}{\partial x^*} \right)_i \simeq \frac{RH_{i+1}^j - RH_i^j}{\Delta x^*} \quad \text{Eq. 28}$$

#### V.4.4 La procédure de minimisation

Une fois que le problème direct est résolu pour un modèle de prédiction de transfert de masse donné, nous devons vérifier si les paramètres à priori du modèle sont optimaux afin qu'ils puissent produire des résultats numériques proches de l'expérience. Dans le paragraphe suivant, la stratégie d'optimisation est présentée afin de prédire les paramètres du modèle, à savoir la capacité de stockage d'humidité, les conductivités liquide et de vapeur d'eau. Nous utilisons la procédure de minimisation des erreurs  $J$  pour identifier les paramètres. Ainsi, l'algorithme de descente de gradient à pas fixe est utilisé (cf. Figure V- 17). L'avantage de l'algorithme retenu est supporté par sa simplicité de programmer et sa fiabilité. Nous nous ne sommes pas intéressés par une comparaison entre les algorithmes d'optimisation mais notre objectif est de pouvoir identifier plusieurs paramètres à la fois. En effet, pour le calcul du gradient, une équation de sensibilité a été résolue.

Le schéma suivant représente notre démarche d'optimisation [25]. Dans un premier instant, on va résoudre l'équation pour un paramètre initiale. Le choix initiale de ce paramètre ne fera pas l'objet de notre centre d'intérêt même que beaucoup des études ont été faite et qui proposent des algorithmes à priori pour choisir ce paramètre. Nous nous contentons par un choix qui nous semble capable de produire des solutions proches. Ce choix sera bien pris après une acquisition d'expériences numériques de la simulation du modèle présenté.

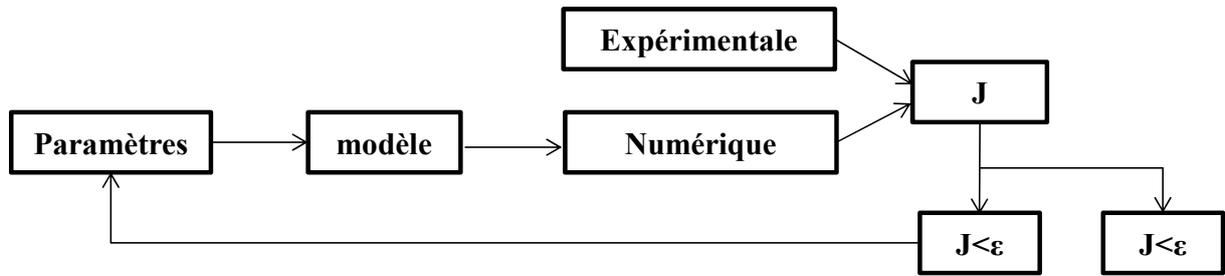


Figure V- 17 : La procédure entreprise

Une fois les paramètres initiaux sont choisis, la simulation sera faite avec ces paramètres et une critère de comparaison avec les données expérimentales est réalisé comme suit :

$$J(P_t) = \int_0^x \left\| RH_{Num}(x, T) - \widetilde{RH}_{Exp}(x, T) \right\|^2 dx \quad \text{Eq. 29}$$

Les fonctions  $J(P)$  indiquent l'erreur quadratique entre les valeurs expérimentales et les valeurs obtenues par le problème d'état pour des paramètres  $P$  [25]. La forme de la fonction est présentée sous sa version dimensionnelle.

$P$  représente les paramètres à identifier. Dans notre cas, ces paramètres comprennent la capacité de stockage de l'humidité, les conductivités de la vapeur et du liquide d'eau.

$$P_t = C_m^*(RH); K_l^*(RH); K_v^*(RH); \quad \text{Eq. 30}$$

Si la valeur de la fonction de minimisation est minimale, on dit que le problème est résolu, sinon, on va minimiser le  $J(P)$ .

Afin de minimiser la fonction, on adopte de calculer la dérivée de la fonction

$$\frac{dJ(P_t)}{dP} = \Delta x \cdot \sum_{i=0}^{N_x} \frac{d}{dP} \left\| RH(x, T) - \widetilde{RH}_{Exp}(x, T) \right\|^2 = 2\Delta x \cdot \sum_{i=0}^{N_x} \frac{dRH(x, T)}{dP} \left( RH(x, T) - \widetilde{RH}_{Exp}(x, T) \right) \quad \text{Eq. 31}$$

Il apparait dans l'équation l'élément  $dRH/dP$  qui sera obtenu en résolvant une équation de sensibilité à travers l'équation 32. Pour mettre à jour les paramètres, cette dérivée  $dJ/dP$  sera

considérée comme un gradient de descente et que les nouveaux paramètres sont mis à jour comme montré sur l'équation 33.

$$P_{t+1} = P_t - \alpha_p \frac{dJ}{dP}(P_t) \text{ Eq. 32}$$

Tel que nous  $\alpha_p$  est l'étape de minimisation, dans ce cas, l'étape choisie est fixée de telle manière que tous les paramètres sont réglés, jusqu'à ce que le fonctionnel vérifie le critère d'arrêt imposé.

$$P = \arg \min(J) \text{ Eq. 33}$$

Comme pour le problème d'état, une partie du code est utilisée pour calculer la minimisation sous Matlab, comme le montre la Figure V- 18.

1. **Input** Experimental points  $RH_{Exp}(x;t=0,ts)$

Arbitrary initialization parameters  $P_0$

2. **Begin** Iteration  $k \leftarrow 0$

While  $J > J_{min}$  do

|  $k \leftarrow k+1$

| for  $\varepsilon \leq \varepsilon_{adm}$

| Get  $RH_{Num}$  from simulation

| Calculate

$$J(P_t) \leftarrow \int_{\Omega} \int_0^{t_f} \left\| RH_{Num}(x,t) - \widetilde{RH}_{Exp}(x,t) \right\|^2 d\Omega dt$$

| Find

$$\frac{dJ(P_t)}{dP}$$

| Actualisate

$$P_{t+1} = P_t - \alpha_p \frac{dJ(P_t)}{dP}$$

| end

$$P = Argmin(J)$$

Figure V- 18 : L'algorithme de minimisation

#### V.4.5 Résolution numérique

Dans cette partie, la résolution numérique est entreprise sous Matlab<sup>®</sup>. Cet environnement de travail recouru permet d'implémenter la méthode d'identification développée. En effet, Il permet de développer l'algorithme de minimisation adopté et basé de la simulation du transfert de masse.

L'étude du problème d'état (Eq.21) nécessite l'application de conditions limites homogènes et adéquates, pour ce faire ; nous avons choisi de dédier le premier et le dernier capteur après stabilisation comme conditions aux limites au type Dirichlet.

#### V.4.6 Effet des paramètres initiaux

De façon générale, la question du choix initial de paramètres est cruciale dans toute procédure d'identification et dans tout processus itératif. Ceci est d'autant plus vrai pour les problèmes non-linéaires convexes. Pour notre part, on a procédé à des simulations pour déterminer le choix des paramètres initiaux. Par la suite, on a étudié l'effet d'une perturbation autour de ces paramètres initiaux sur les optimums identifiés avec la méthode d'identification qu'on a mis en place. Ainsi, on a 3 paramètres P1, P2 et P3 entrée et on fait une comparaison de résultats de sorti.

Il est à noter que le choix des fonctions correspond à une forte diminution de  $K_v$  et une forte augmentation de  $K_l$  pour une humidité relative élevée. En effet, la capacité de stockage d'humidité  $C_m$  est représentée par un modèle GAB [26] avec trois paramètres à identifier ( $m_{GAB}$ ,  $C_{GAB}$  et  $K_{GAB}$  dont l'allure traduit une légère diminution de la capacité de stockage d'humidité pour des faibles humidités relatives combiné à une augmentation de cette dernière pour une humidité relative élevée. P-2 et P-3 correspondents aux paramètres environ de la sortie P-1 comme montre le tableau suivant. La capacité de stockage d'humidité, les conductivités de vapeur et liquide d'eau résultants de ces trois ensembles de paramètres sont représentées sur le Tableau V-3, qui montre la grande variété de mécanismes de transport considérés.

$$w(RH) = \frac{m_{GAB} C_{GAB} K_{GAB} RH}{(1 - KRH)(1 + K(C - 1)RH)}; C_m(RH) = \frac{d}{dRH}(w(RH)) \quad \text{Eq. 34}$$

$$K_l(RH) = K_{l, dry} \exp(m \cdot RH) \quad \text{Eq. 35}$$

$$K_v(RH) = K_{v, dry} \exp(n \cdot RH) \quad \text{Eq. 36}$$

|               | P-1 Entrés | P-1 Sortis  | P-2 Entrés | P-2 Sortis  | P-3 Entrés | P-3 Sortis  |
|---------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|
| $m_{GAB}^*$   | 0.07       | 0.06533     | 0.05       | 0.1659      | 0.045      | 0.07315     |
| $c_{GAB}$     | 2          | 0.8253      | 1.163      | 0.2241      | 0.7        | 0.4114      |
| $k_{GAB}^*$   | 0.5        | 0.7121      | 0.7287     | 0.6372      | 0.7        | 0.6727      |
| $K_l^*_{dry}$ | 0.4        | 2.0604      | 0.6        | 1.8396      | 1          | 1.5316      |
| $m$           | 6          | 6.1605      | 6          | 6.1166      | 6          | 6.0517      |
| $K_v^*_{dry}$ | 4          | 5.6142      | 5          | 6.6770      | 7          | 7.7698      |
| $n$           | -6         | -5.9997     | -6         | -5.9996     | -6         | -5.9998     |
| $J^*$         | -          | 3.8794e-010 | -          | 1.2939e-011 | -          | 2.6923e-016 |

Tableau V- 3 : Paramètres donnés à priori sélectionnés et paramètres de modèle d'humidification identifiés (sortie)

Les paramètres correspondant aux Figure V- 19, Figure V-20 et Figure V- 21 sont présentés dans le Tableau V- 3. Les valeurs de sortie adimensionnelles (trait continu) sont toutes très proches entre eux dans la plage de faible humidité relative pour  $K_l$  et dans la plage de forte humidité relative pour  $K_v$ . Tandis que la différence dans toute la plage d'humidité relative entre les trois scénarios d'identification se situe dans la capacité de stockage hydrique  $C_m$  comme montre la figure 19. La variation de  $K_l$  vient du fait que sa contribution est très faible dans la plage d'humidité relative faible (moins de 50 %). Entre autre, et contrairement au premier cas, la variabilité de  $K_v$  vient du fait que sa contribution est très faible dans la plage d'humidité relative forte (plus de 50 %). Par conséquent, la sensibilité des paramètres  $m$  et  $n$  est très faible et n'est donc pas reproductible par rapport aux autres paramètres des équations de  $C_m$ ,  $K_l$ , et  $K_v$  proposées.

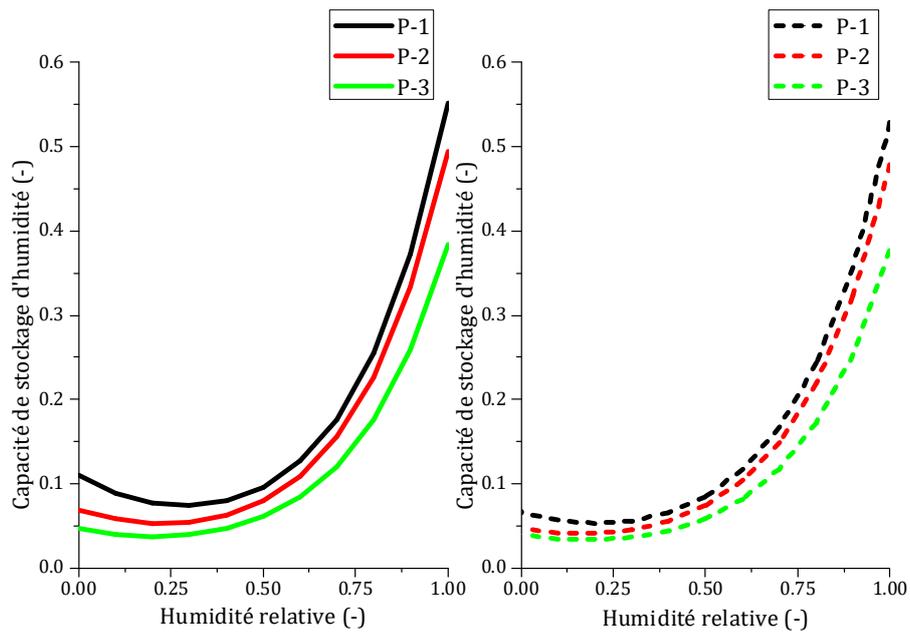


Figure V- 19 : La capacité de stockage hydrique (Entrés en traits continus, sortis en traits discontinus)

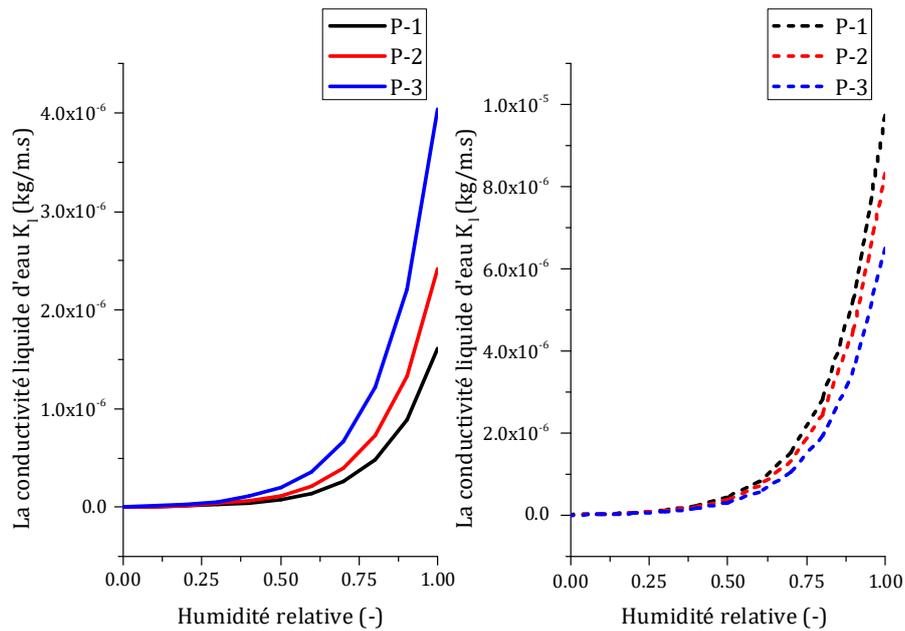


Figure V- 20 : La conductivité liquide d'eau (Entrés en traits continus, sortis en traits discontinus)

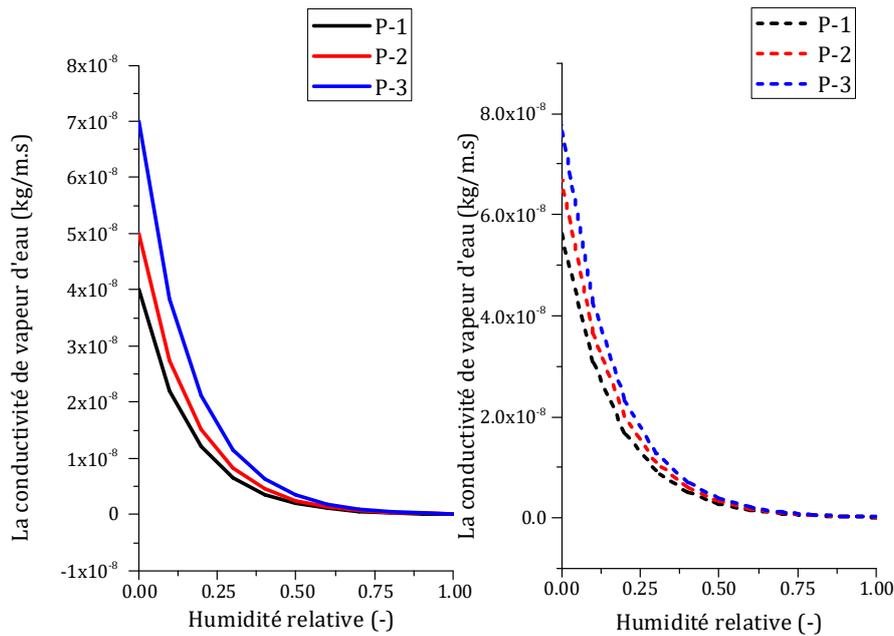


Figure V- 21 : La conductivité de vapeur d'eau (Entrés en traits continus, sortis en traits discontinus)

Les Figure V- 22 (a et b) juxtaposent de façon très claire l'effet des paramètres donnés à priori (trait continu) sur les paramètres de sorti des perméabilités liquide et à la vapeur d'eau successivement. Les résultats montrent que les paramètres d'entrés de la troisième identification (P-3) sont proches avec ceux de la sortie. Ces derniers sont tiré et pris en compte pour mieux prédire le comportement hydrique de ce matériau et comme montre le Tableau V- 3, l'erreur de minimisation adimensionnelle entre les résultats expérimentaux et ceux de prédiction est de l'ordre de  $2.7 \times 10^{-16}$ . La Figure V- 22 (c) présente le rapport entre ces deux perméabilités qui peut varier quasi-linéairement de  $1 \times 10^{-6}$  de l'état sec jusqu'au 1 à l'état saturé.

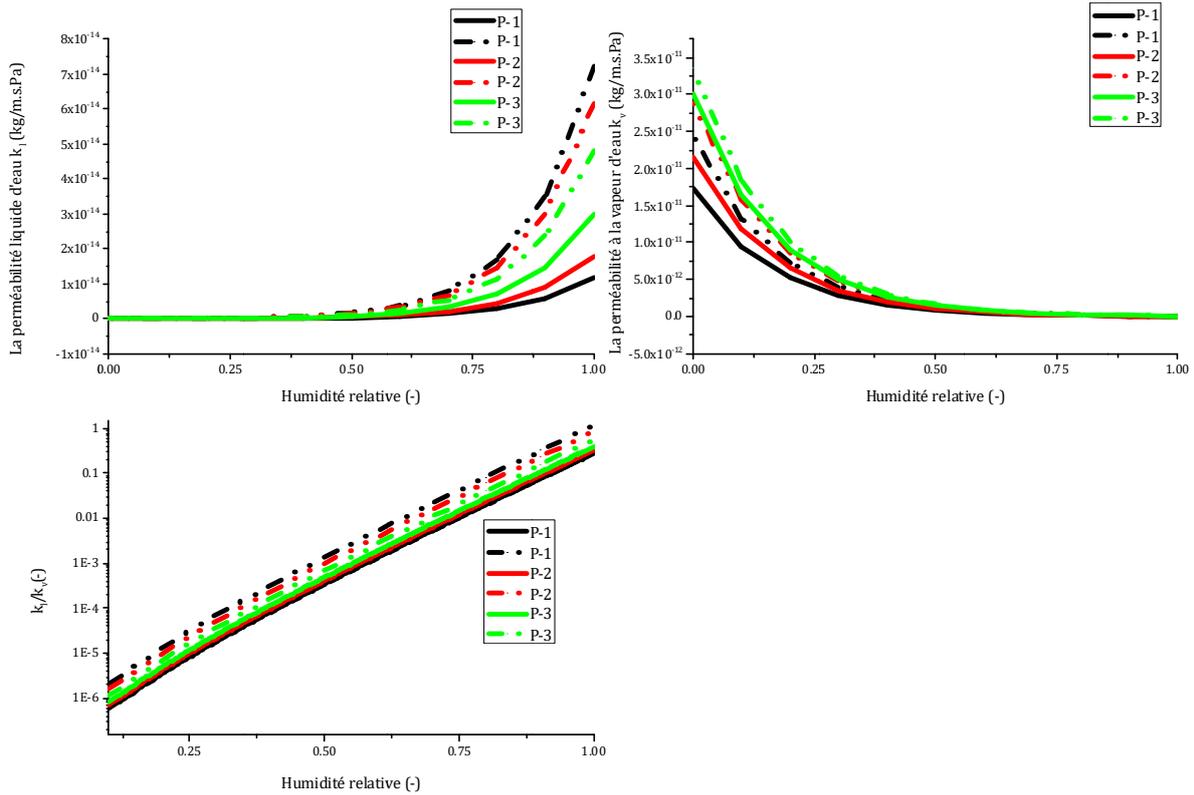


Figure V- 22: La perméabilité liquide d'eau (a), la perméabilité à la vapeur d'eau (b) et le rapport entre les deux (c)

#### V.4.7 Confrontation des résultats de minimisation

Dans le but de qualifier la présente méthode d'identification, nous allons suivre d'une part l'évolution expérimentale de l'humidité relative au sein du matériau pour trois échantillons cubique de 10cm x 10cm x 10cm. Cependant, il convient de noter que les valeurs numériques de prédiction avec les paramètres identifiés P-3 sont en concordance et dans la marge d'erreur  $\sigma$  avec ceux trouvés expérimentalement sur 3 échantillons. L'écart est déterminé moyennant deux types d'erreur, le premier est lié à la précision de capteur et le seconde à l'écart type de la mesure.

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{mesure}^2 + \sigma_{capteur}^2} \text{ Eq. 37}$$

Tels que  $\sigma_{mesure}$  est l'écart type de trois mesures, et  $\sigma_{capteur}$  est la précision du capteur.

Nous remarquons dans la Figure V- 23 que le modèle de prédiction est en accord avec les résultats expérimentaux de 0 à 200 minutes. Au-delà de ça, nous remarquons une différence

mais ça rentre toujours dans la marge d'erreur. Cette différence peut être expliquée par le choix de la condition aux limites choisie dans le modèle numérique.

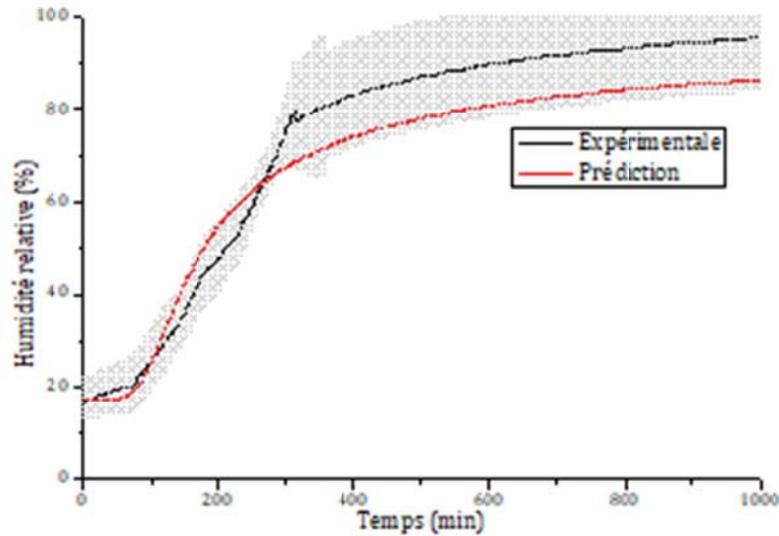


Figure V- 23: Evolution de l'humidité relative au sein du matériau à 2,5 cm de profondeur en fonction du temps

D'autre part, nous avons effectué un test d'adsorption capillaire. En effet, la sorptivité est une propriété définie par le taux d'absorption d'eau par tout matériau poreux lorsqu'il est exposé à une source d'eau libre, et déterminée expérimentalement à partir du test d'absorption capillaire mesuré par la méthode gravimétrique traditionnelle recommandée par [27].

Dans cette méthode, le volume cumulé d'eau absorbée par unité de surface  $i$ , augmente avec le temps [28]:

$$i_{Exp}(t) = \frac{\Delta m}{\rho_w A_c} \text{ Eq. 38}$$

Tels que :  $i$  est la quantité d'eau cumulée [m] ;  $\Delta m$  est la masse d'eau absorbé qui répond à partir du temps de l'absorption [kg] ;  $t$  est le temps de l'absorption d'eau [min] ;  $\rho_w$  est la densité de l'eau [kg/m<sup>3</sup>] ;  $A_c$  est la surface de l'échantillon exposée à l'eau [m<sup>2</sup>].

La quantité d'eau cumulée peut être écrite sous la forme suivante

$$i_{Num}(t) = \frac{\rho_s}{\rho_w} \int_0^x (w(x,t) - w(x,0)) dx \text{ Eq. 39}$$

Où  $\rho_s$  : est la masse volumique sèche du matériau [kg/m<sup>3</sup>] ;  $w$  est la teneur en eau [%].

La Figure V- 24 présente l'évolution de la quantité d'eau absorbée trouvées expérimentalement à partir de trois échantillons de 10 cm x 10 cm x 10 cm et à partir du

modèle de prédiction. Nous remarquons une légère différence à court terme environ 500 minutes, qui s'explique par la condensation des ménisques d'eau dans la partie inférieure des échantillons sous l'effet de gravité et qu'ils empêchent le mécanisme de transfert de vapeur d'eau. De plus, les résultats sont très similaires en ce qui concerne les valeurs numériques à long terme d'environ 3000 minutes.

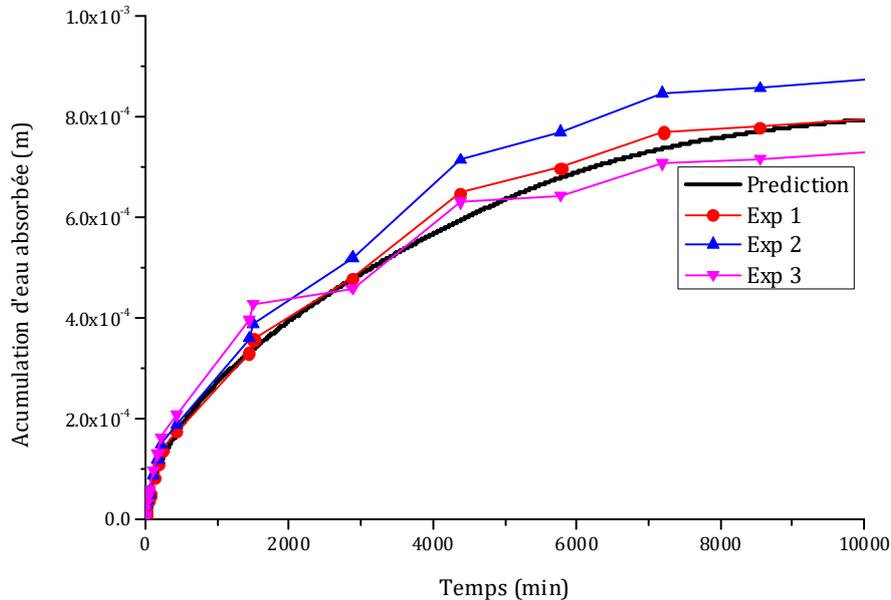


Figure V- 24: Accumulation d'eau absorbée

À partir de ces résultats, nous pouvons considérer que selon le modèle d'humidification utilisé, et compte tenu des mesures d'absorption capillaire et le suivi d'humidité relative au sein du matériau, les paramètres identifiés les mieux adaptés (P3). Cette contribution confirme la pertinence de la méthodologie appliquée.

### V.5 Essais à l'échelle de la paroi et simulation numérique

Les essais réalisés dans cette partie sont au nombre de deux. Dans le 1<sup>er</sup>, appelé « essai sous sollicitation de type échelon », nous avons considéré des sollicitations hygrothermiques en convection sans précipitation rayonnement en faisant varier la température et l'humidité relative de l'air du caisson extérieur selon un signal de type échelon. L'objectif de ce test est double, le 1<sup>er</sup> est de caractériser les coefficients d'échange thermique et massique par convection et le 2<sup>ème</sup> est de voir la capacité du modèle à bien prédire le comportement hygrothermique de la paroi en surface et en volume.

Dans le 2<sup>ème</sup> essai réalisé, appelé « essai sous sollicitations réalistes », nous avons considéré des sollicitations sinusoïdales en température avec des épisodes de précipitation et de

rayonnement alternés. L'objectif de cet essai est justement d'étudier l'effet des cycles de séchage/humidification par rayonnement/précipitation.

### **V.5.1 Essai sous sollicitation de type échelon**

Les évolutions des températures  $T$  et d'humidité relative  $HR$  dans les deux compartiments sont illustrées sur les Figure V- 25, Figure V- 26. Trois capteurs hygothermiques notés  $Ext_i$  et  $Int_i$  sont installés dans les compartiments (cf. Figure V- 12). Dans le compartiment extérieur la sollicitation en température et de type échelon variant de 10 à 20°C avec des paliers d'une journée. alors qu'elle est constante dans le compartiment intérieur avec une température égale à 20°C. L'humidité est laissée en évolution libre dans les deux compartiments, la variation de l'humidité relative est la conséquence de l'interaction entre l'ambiance et toutes les parois développées à l'intérieur des caissons (paroi étudiée, parois latérales des caissons, serpentin...). Ainsi, la baisse de l'humidité relative observée avec la baisse de température sur l'intervalle de temps 1440-2880 par exemple correspond à des flux entre l'ambiance et les différentes surfaces notamment de la condensation sur le serpentin, la surface la plus froide dans le compartiment extérieur.

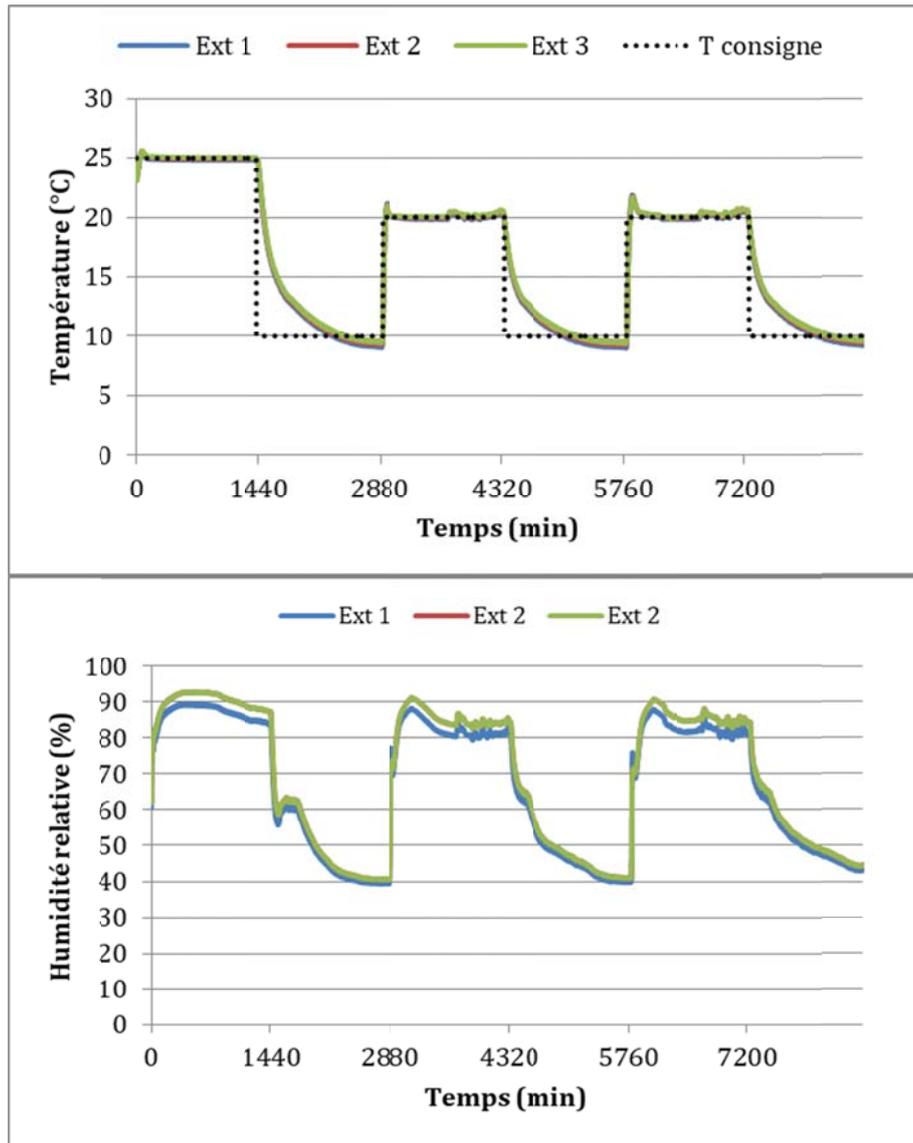


Figure V- 25: La variation de température et de l'humidité relative dans le caisson extérieur

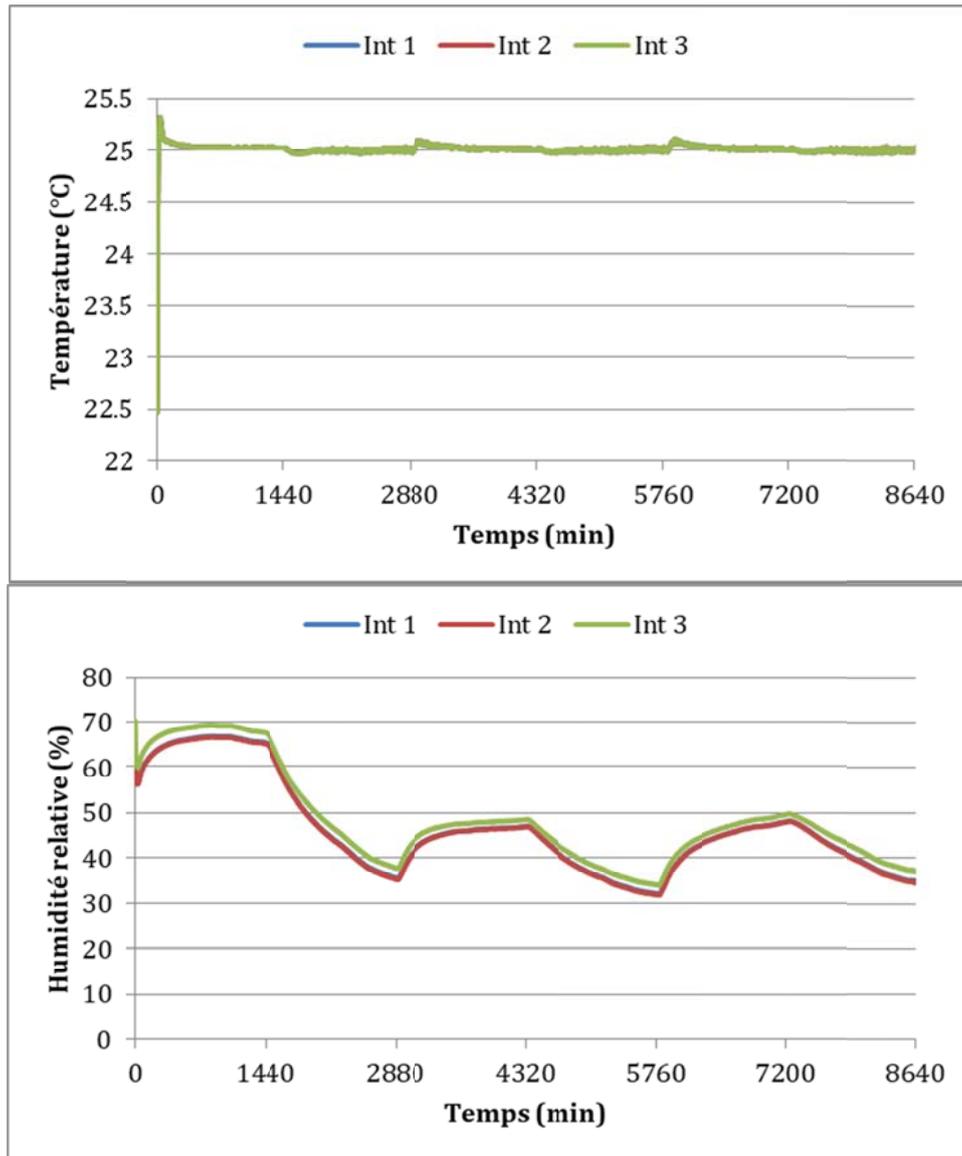


Figure V- 26: La variation de température et de l'humidité relative dans le caisson intérieur

### V.5.1.1 Recalage des coefficients d'échange thermique et massique $h_c$ et $h_m$

Les échanges hygrothermiques en surface dépendent en partie des coefficients d'échange thermique et massique par convection. Ces derniers dépendent d'un certain nombre de paramètres dont la vitesse et la nature de l'écoulement. Il devient alors indispensable d'évaluer ces paramètres pour une meilleure prédiction. Le présent essai permet de la faire à travers une procédure de calibration.

Pour ce faire, une étude paramétrique portant sur  $h_c$  est entreprise moyennant le code de calcul à base d'élément finis développé sous Comsol Multiphysics® (cf. page 152) en faisant varier  $hc_{ext,int}$  de  $1 W/(m^2K)$  à  $25 W/(m^2K)$  avec un pas de  $1 W/(m^2K)$ . Le coefficient d'échange massique est déduit de la relation de Lewis ci-dessous :

$$h_m = 7e^{-9} h_c \text{ Eq. 40}$$

Cette dernière est confirmée expérimentalement par Schwarz [29].

Les coefficients d'échange convectif et massique qui minimisent l'écart entre la mesure et la modélisation sur T et HR aux bords extérieur et intérieur sont résumés sur le Tableau V- 44.

| Compartiment extérieur |                          | Compartiment intérieur |                          |
|------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|
| $h_{cext} [W/m^2.K]$   | $h_{mext} [kg/m^2.s.Pa]$ | $h_{cint} [W/m^2.K]$   | $h_{mint} [kg/m^2.s.Pa]$ |
| 13                     | $9.1 \times 10^{-8}$     | 20                     | $14 \times 10^{-8}$      |

Tableau V- 4 : Coefficients d'échange massique et convectif

Les coefficients d'échanges convectifs sont plus grands du côté intérieur car les vitesses d'écoulement proche paroi sont plus importantes du fait d'une ventilation moins perturbée par la présence d'objet à l'intérieur du compartiment.

Les écarts mesure-modélisation sont présentés sur la Figure V-27, Figure V- 28, Figure V- 29 et Figure V- 30. Nous pouvons observer une bonne concordance entre les résultats numériques et expérimentaux. En particulier, sur le bord extérieur, nous remarquons que l'écart le plus faible se situe dans les zones stabilisées avec un écart relatif de l'ordre de 2% pour T et de 10% pour HR. Au droit de l'échelon, les écarts peuvent aller jusqu'à 4% pour T et 30% pour HR. Le compartiment intérieur, du fait de conditions statiques en température présente des écarts légèrement moins importants.

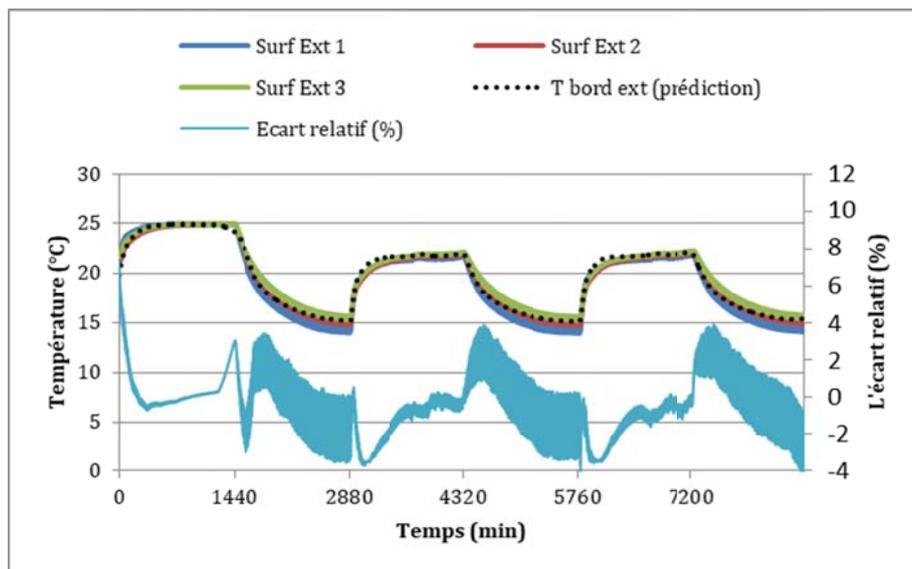


Figure V- 27: Évolution de la température sur le bord extérieur

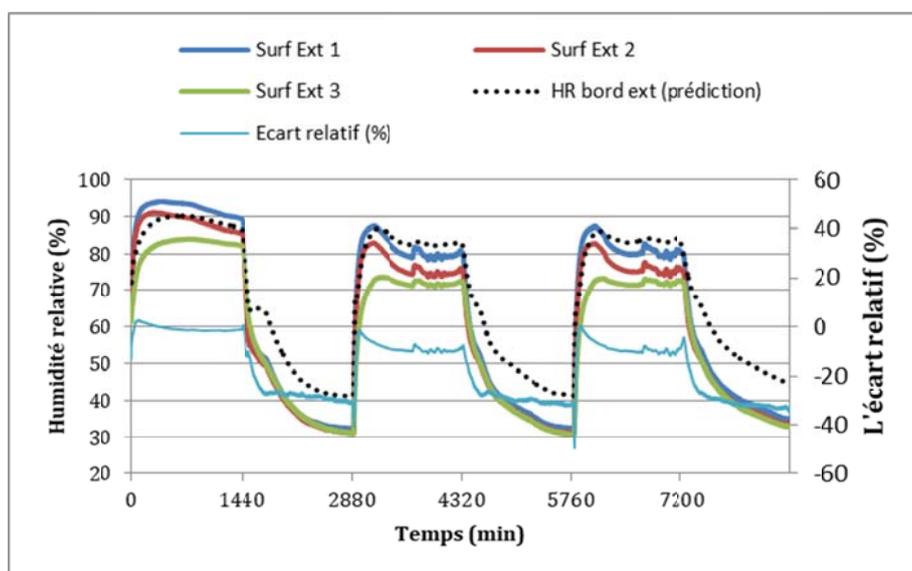


Figure V- 28: Évolution de l'humidité relative sur le bord extérieur

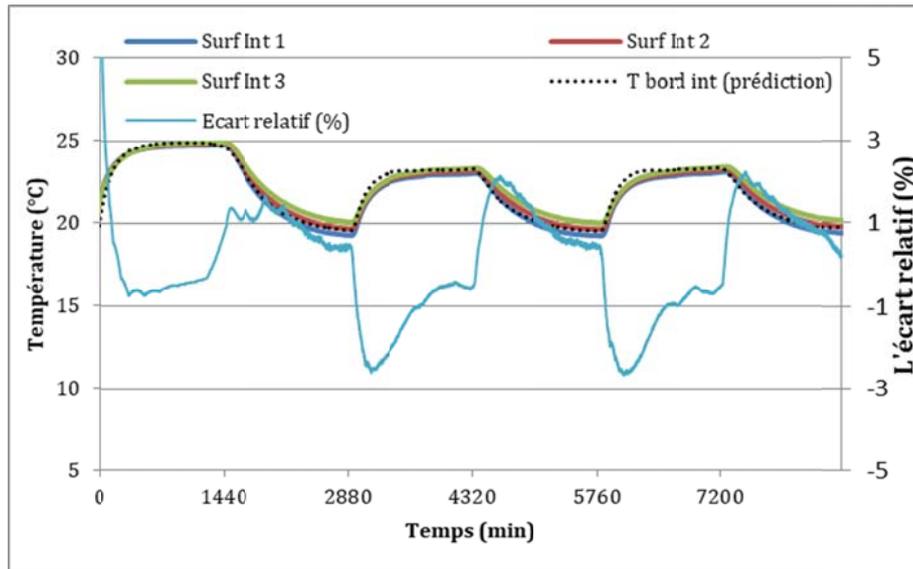


Figure V- 29: Évolution de la température sur le bord intérieur

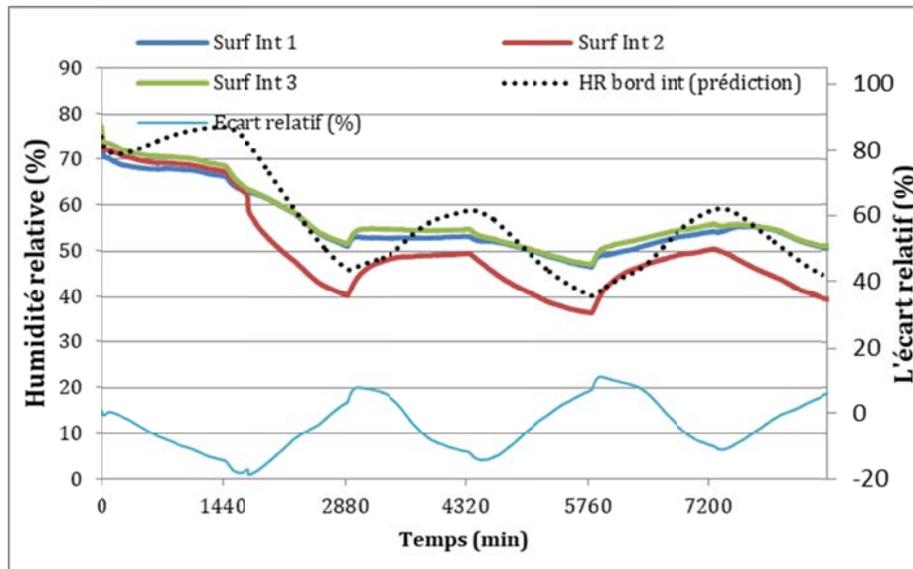


Figure V- 30: Évolution de l'humidité relative sur le bord intérieur

### V.5.1.2 Résultats de la confrontation entre la mesure et la modélisation au cœur de la paroi

L'évolution de la température et de l'humidité relative au sein de la paroi dans différentes zones et à différentes profondeurs sont reprises dans les figures suivantes (Figure V- 31, Figure V- 32, Figure V- 33, Figure V- 34, Figure V- 35 et Figure V- 36). Pour rappel, les schémas présentant la localisation des zones et des capteurs sont présentés dans les La variation soudaine de la température dans l'ambiance engendre une variation rapide en température et une diminution relativement lente par rapport à l'humidité relative. Cela est

expliqué par la cinétique rapide de chaleur par rapport à la masse. En outre, nous remarquons une stabilité de l'écart relatif entre les mesures expérimentales et numérique dans la zone de stabilisation en T de l'ordre de 1% et ne dépasse pas les 5% au moment du changement de T.

Sur le plan hydrique, Les variations de température et d'humidité imposées sur le bord extérieur engendrent des fluctuations en HR au sein du matériau. Cela est expliqué par le fait que l'humidité relative est dépendante de la température. L'écart relatif est de l'ordre de 10%.

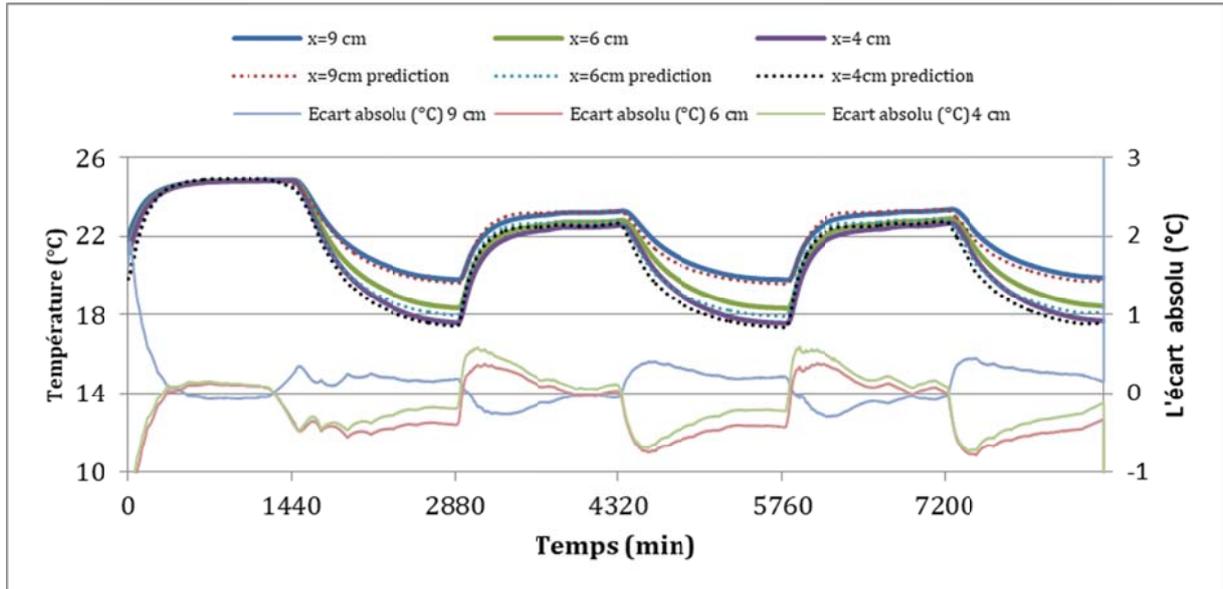


Figure V- 31: Évolution de la température dans la zone 1 à différentes position  $x=4, 6$  et  $9$  cm

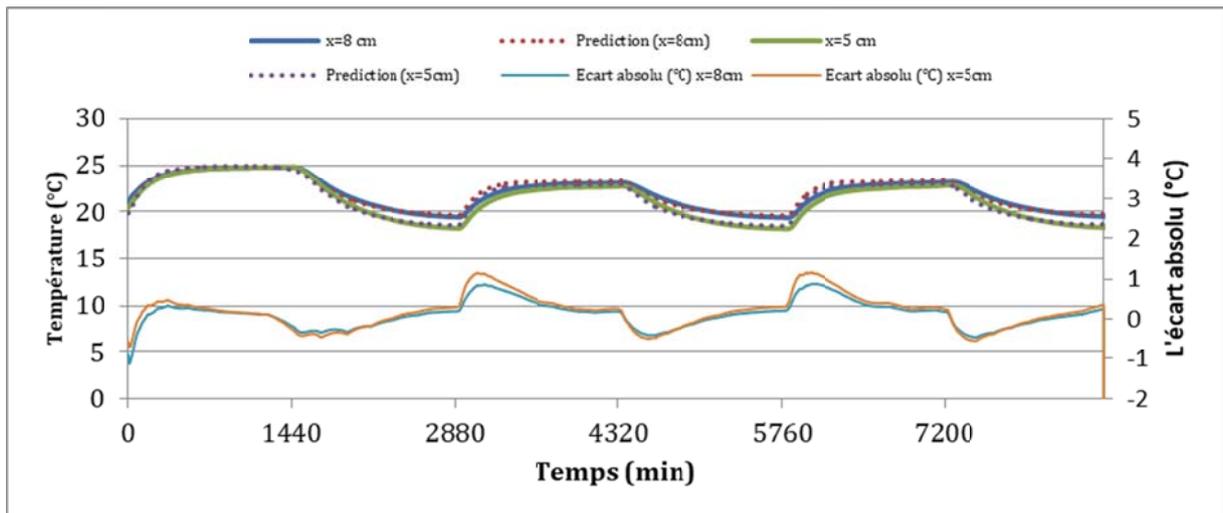


Figure V- 32: Évolution de la température dans la zone 2 à différentes position  $x=5$  et  $8$  cm

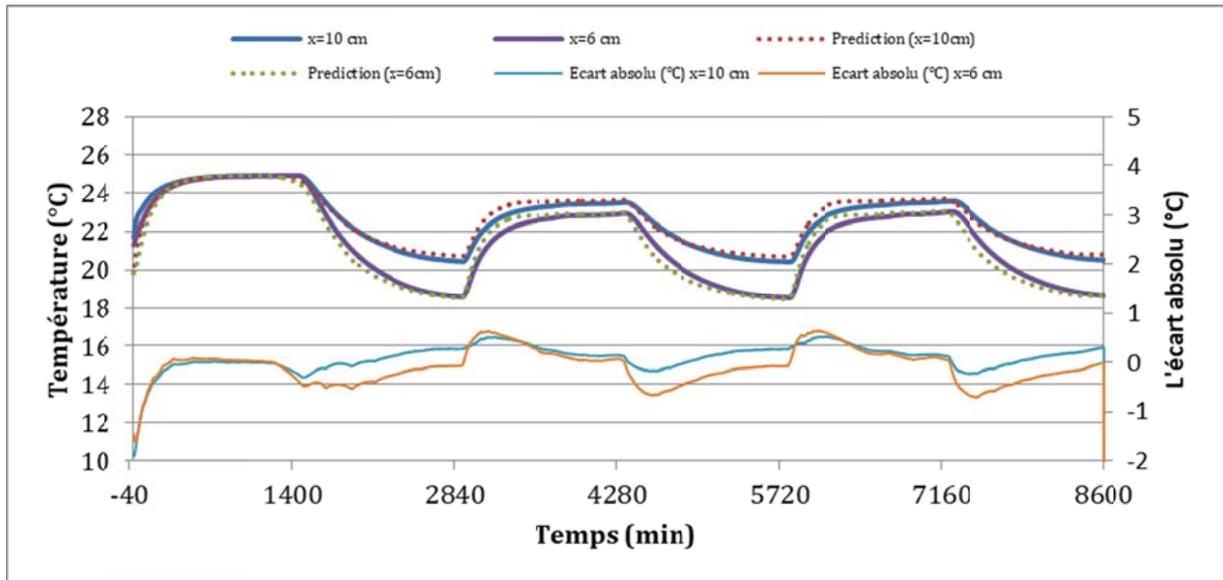


Figure V- 33: Évolution de la température dans la zone 3 à différentes position  $x= 6$  et  $10$  cm

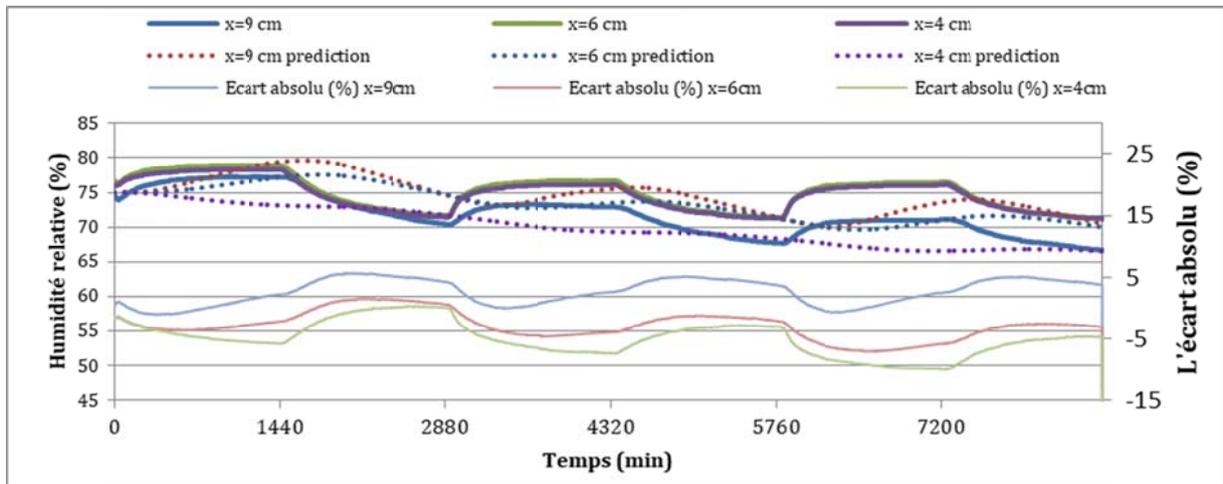


Figure V- 34: Évolution de l'humidité relative dans la zone 1 à différentes position  $x=4, 6$  et  $9$  cm

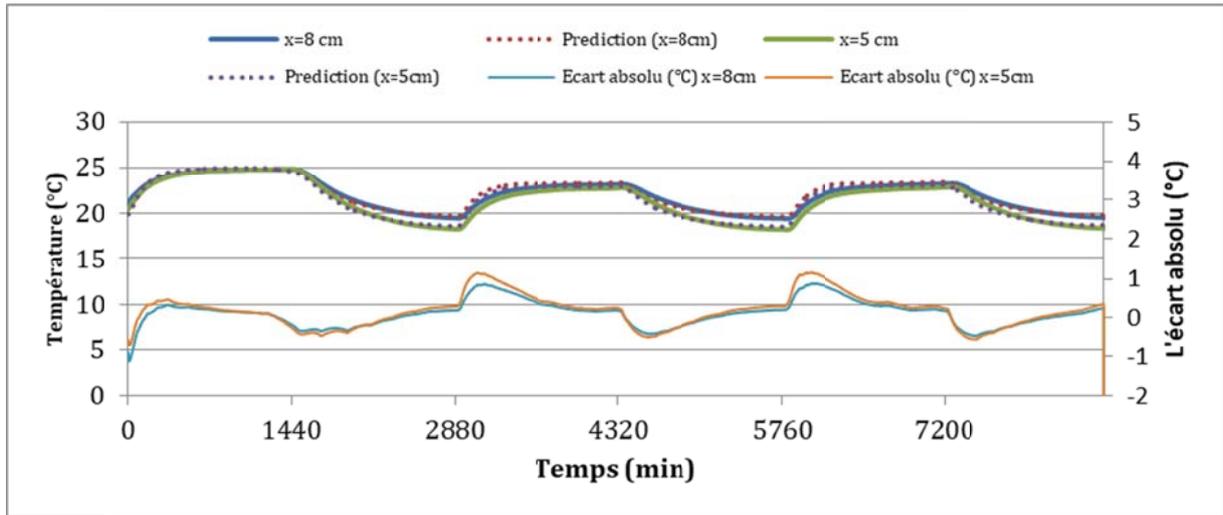


Figure V- 35: Évolution de l'humidité relative dans la zone 2 à différentes position x=5 et 8 cm

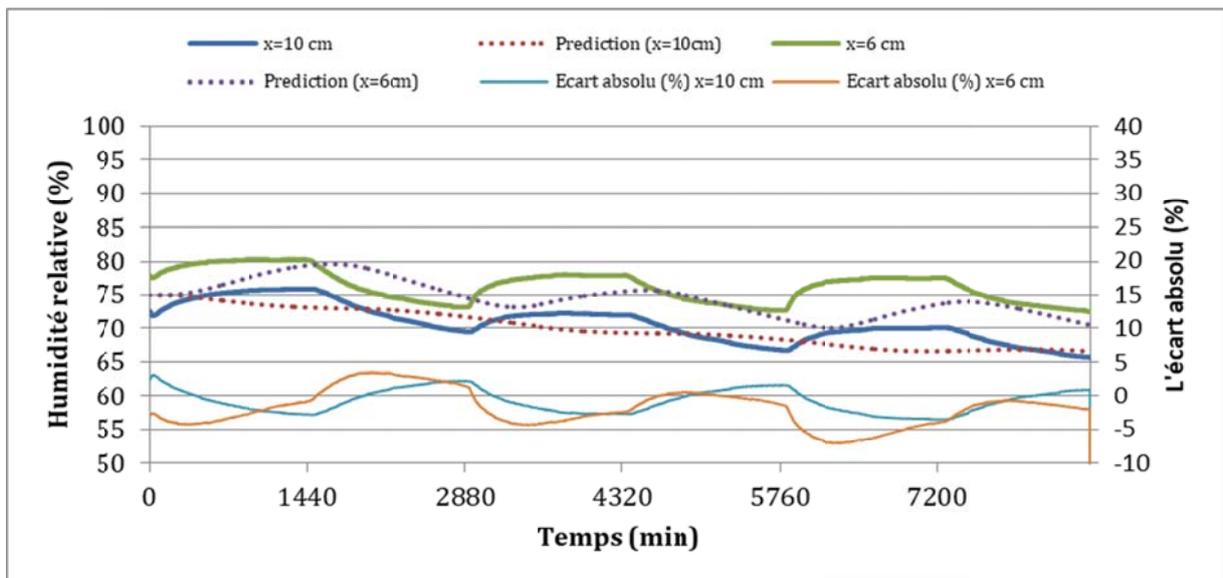


Figure V- 36: Évolution de l'humidité relative dans la zone 3 à différentes position x= 6 et 10 cm

### V.5.2 Test de précipitation et radiation

Les sollicitations sinusoïdales permettent de se rapprocher davantage des conditions réelles auxquelles sont soumises les parois d'un bâtiment. Tout en respectant la plage de fonctionnement du caisson climatique, nous avons retenu une configuration, schématisant les évolutions de la température et de l'humidité relative les radiations solaire CLO/GLO et précipitation, représentées sur les figures suivante (Figure V- 37, Figure V- 38 et Figure V-

39). En effet, le flux de pluie infiltré moyen mesuré par le banc expérimental est de l'ordre de  $8e-5 \text{ kg/m}^2.s$ ,

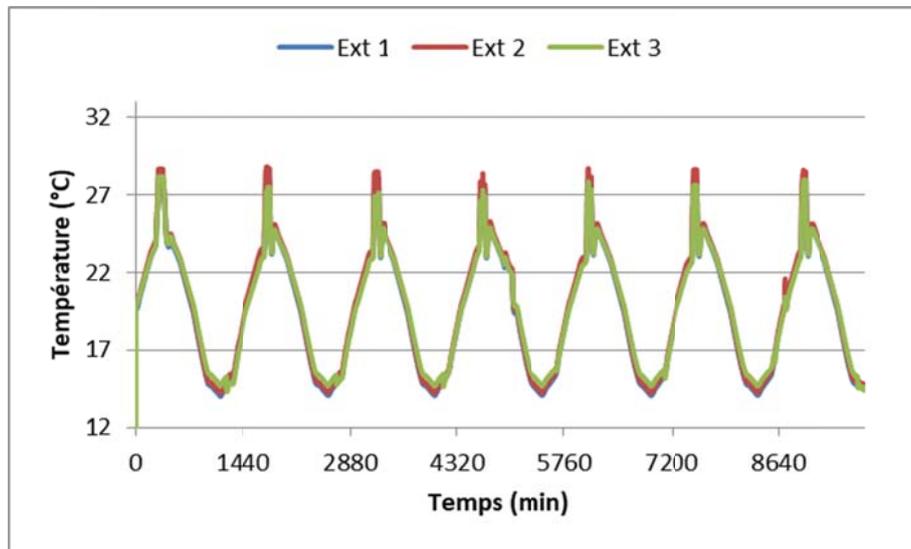


Figure V- 37: Sollicitation de température dans le caisson extérieur

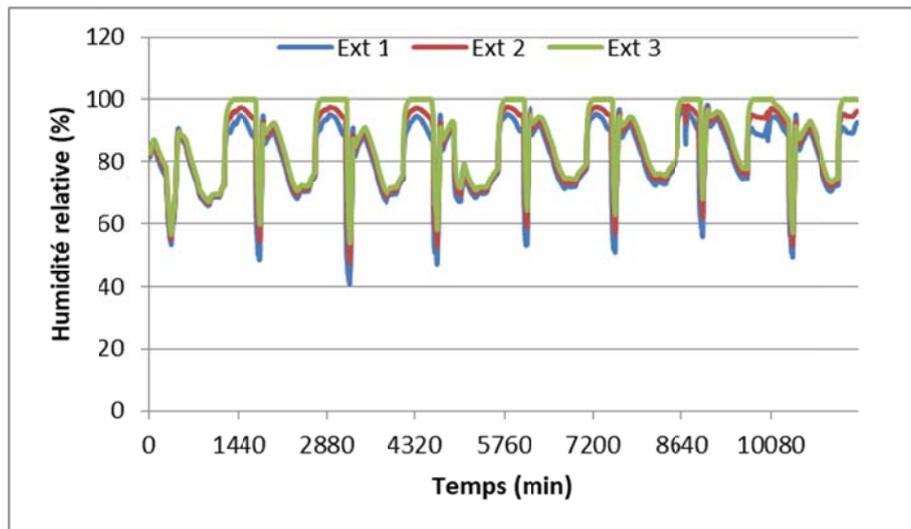


Figure V- 38: Variation de l'humidité relative dans le caisson extérieur

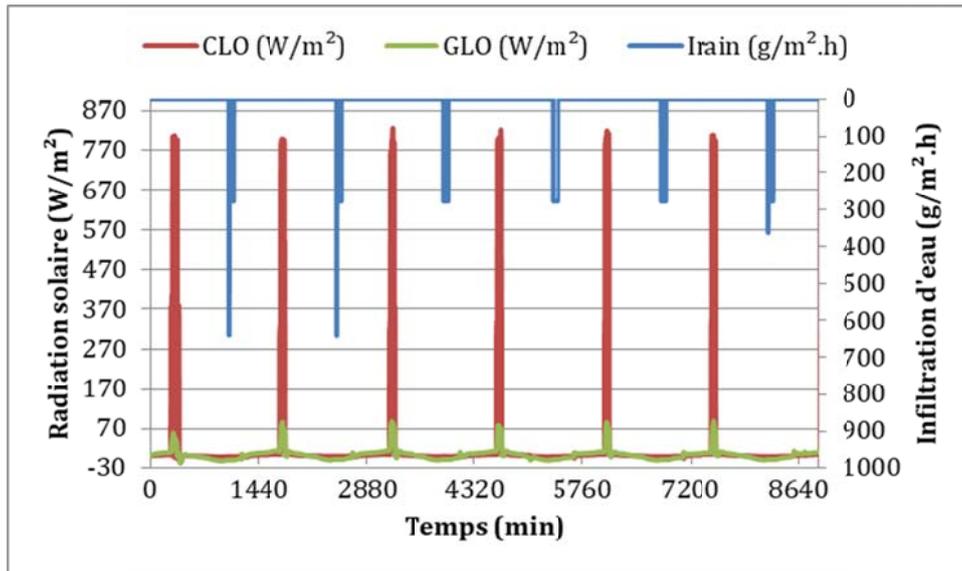


Figure V- 39: Le flux radiation et de pluie infiltrée dans le mur (face extérieure)

Dans le deuxième caisson simulant l'ambiance de bâtiment, nous avons fixé la température à  $20^{\circ}C$ . Et suivant l'évolution de l'humidité relative à l'intérieur comme montrés sur la Figure V- 40 et la Figure V- 41.

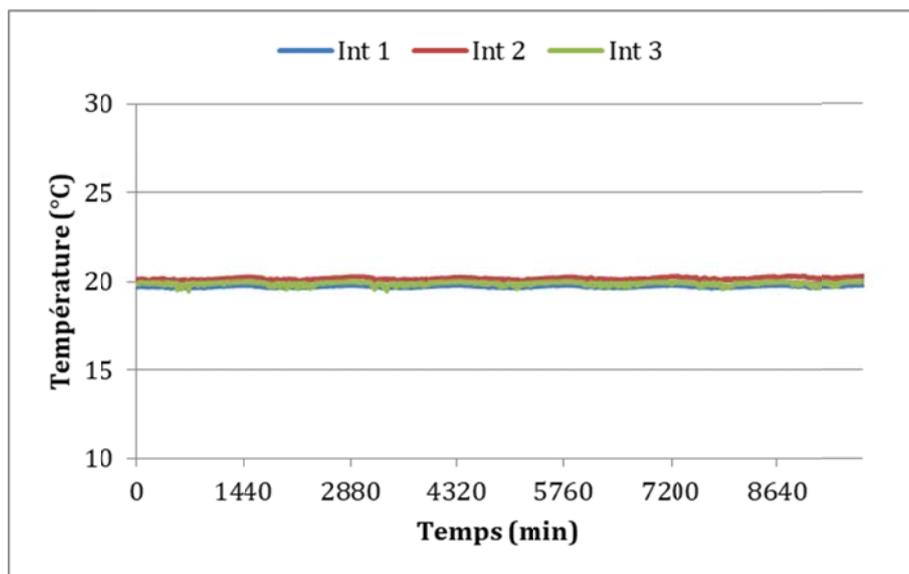


Figure V- 40: Evolution de la température dans le caisson intérieur

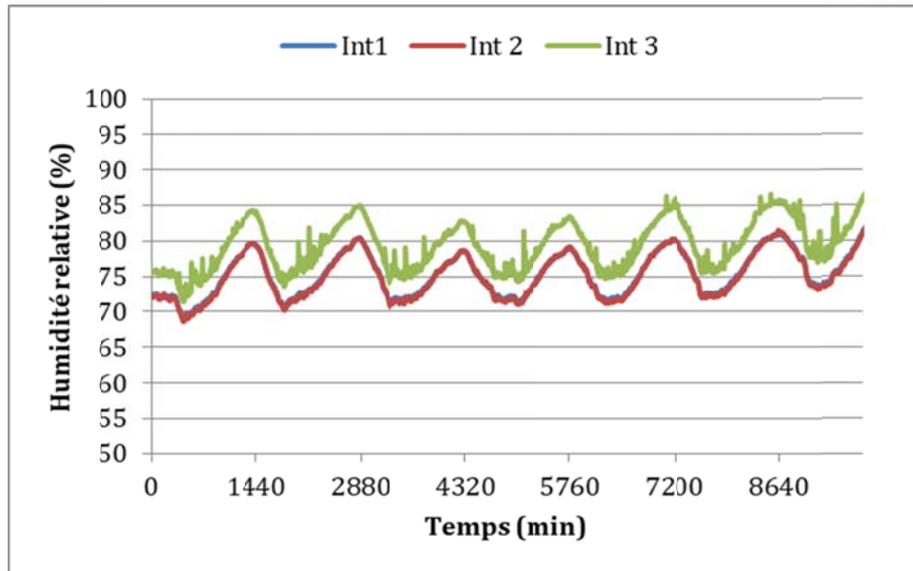


Figure V- 41: Evolution de l'humidité relative dans le caisson intérieur

Les évolutions de température et de l'humidité relative aux bords extérieur et intérieur de la paroi sont présentées sur la Figure V- 42, la Figure V- 43, la Figure V- 44 et la Figure V- 45 respectivement.

On note que sur les 7 jours de sollicitation, la température dans le caisson A fluctue entre 15 et 27°C. Ces variations affectent la température aux bords extérieur et intérieur de la paroi. De plus, les résultats de la modélisation numérique montrent une bonne prédiction de T et de HR avec des écarts relatifs qui n'excèdent pas les 10% pour la température et 20% pour l'humidité relative. Ceci est dû au choix des coefficients d'échange convectif massique et thermique pour ce cas de figure. En effet, lors de la précipitation, le capteur au bord extérieur sera mouillé et ça peut perturber les mesures de T et HR.

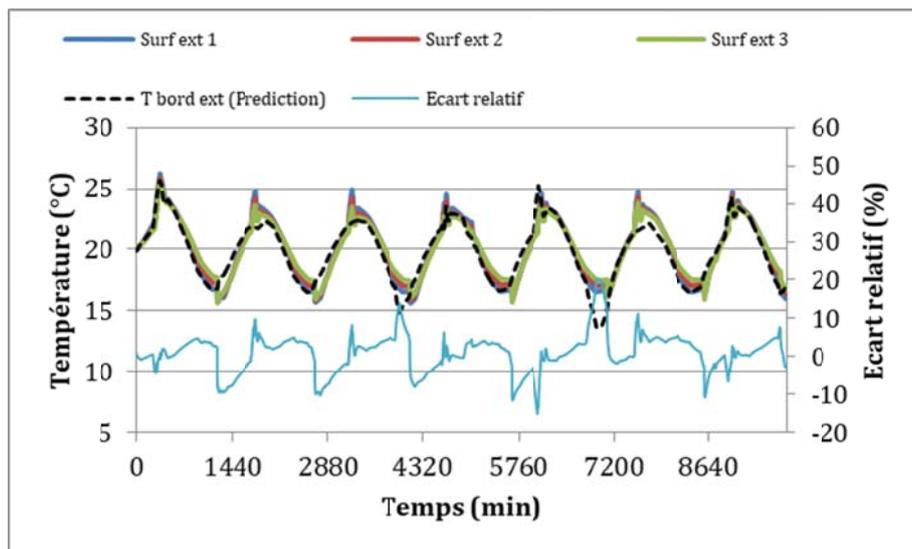


Figure V- 42: Evolution de la température dans le bord extérieur

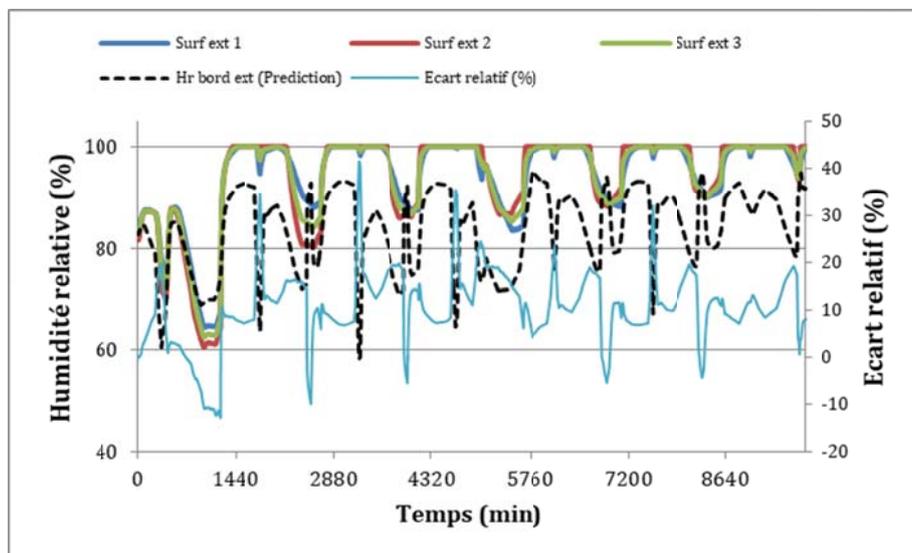


Figure V- 43: Evolution de l'humidité relative dans le bord extérieur

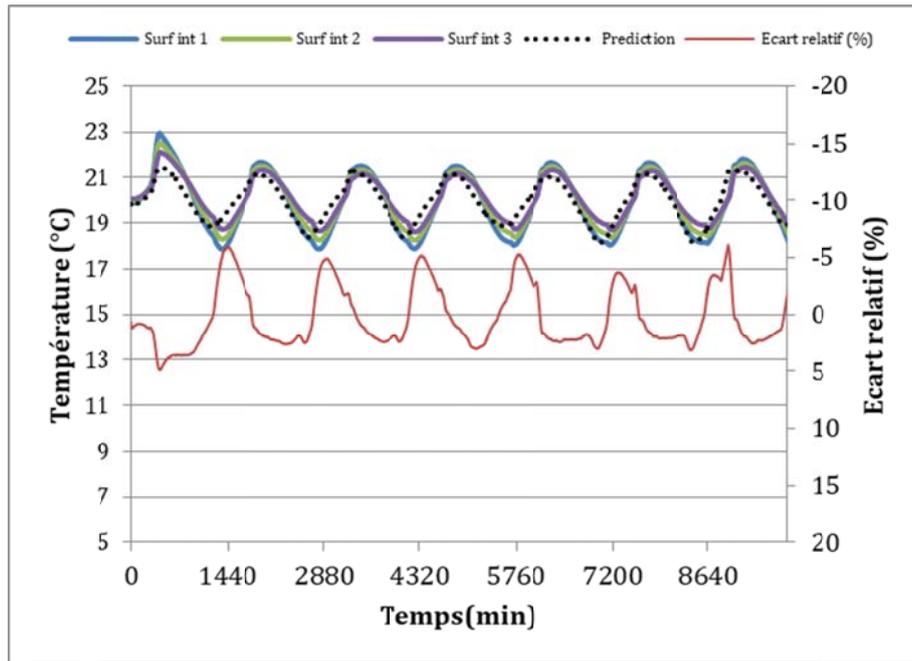


Figure V- 44: Evolution de la température dans le bord intérieur

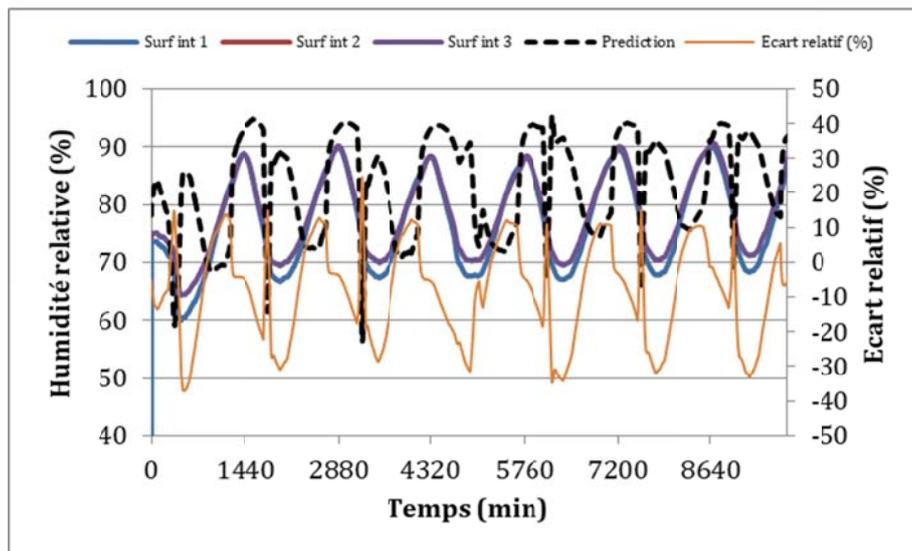


Figure V- 45: Evolution de l'humidité relative dans le bord intérieur

Le comportement hygrothermique de la paroi exposée à une sollicitation sinusoïdale est présenté sur la Figure V- 46, la Figure V- 47, la Figure V- 49 et la Figure V- 50 à plusieurs zones et à plusieurs profondeurs. Sur le plan thermique, on peut voir sur la Figure V- 46 et la Figure V- 47 l'évolution de la température dans la paroi. La température évolue au cours du temps partant d'une valeur de l'ordre de 26°C. L'onde thermique imposée côté extérieur se propage dans la paroi et induit une réponse en phase (faible inertie thermique de la paroi) avec une amplitude de plus en plus atténuée au fur et à mesure qu'on s'éloigne du bord extérieur.

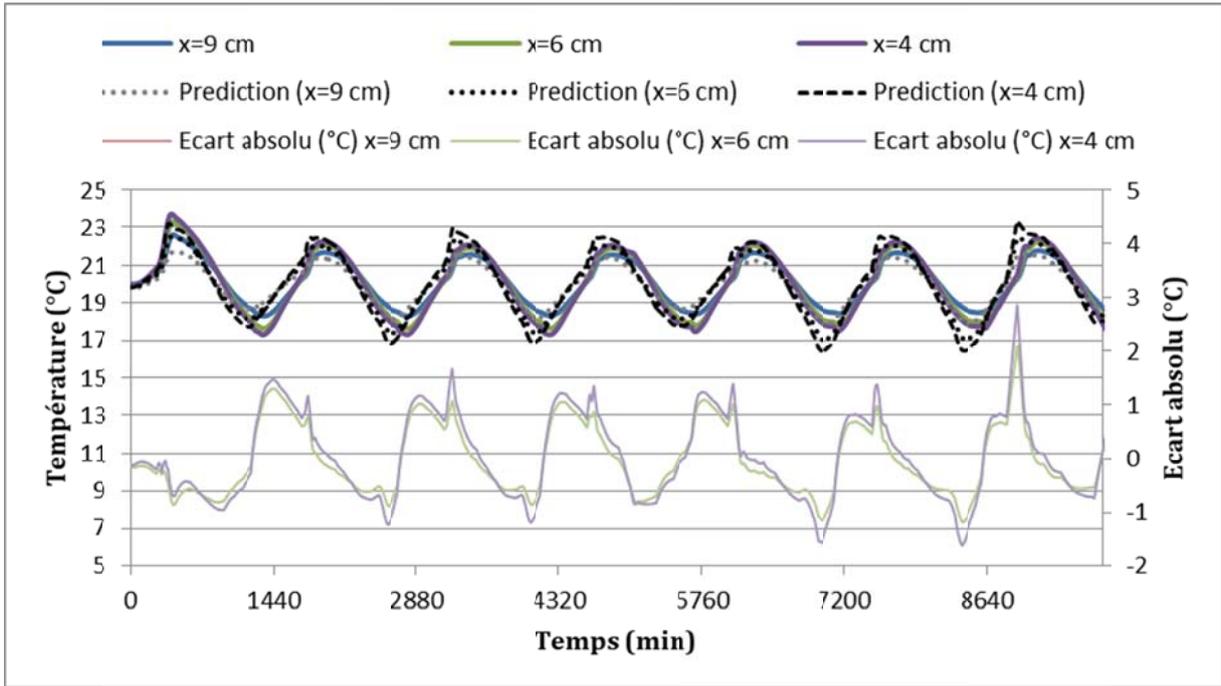


Figure V- 46: Evolution de la température dans différentes position  $x=4, 6$  et  $9$ cm

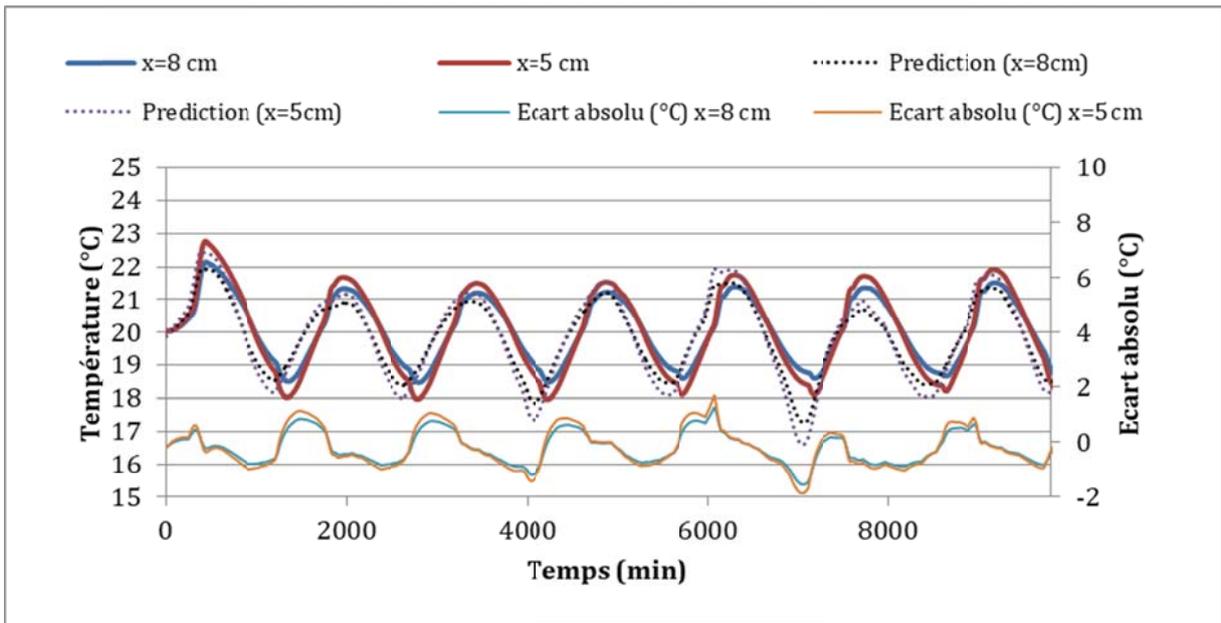


Figure V- 47: Evolution de la température dans différentes position  $x=5$  et  $8$ cm

On peut aussi voir que ce flux est corrélé au gradient de température au bord extérieur (cf. Figure V- 48), Ainsi, on peut déduire à partir de cette courbe la valeur de la conductivité thermique moyenne de notre matériau compte tenu des sollicitations hydriques imposées. Elle est estimée à  $1.4 \text{ W/m.K}$ . On remarque que cette valeur est surestimée par rapport à celle déterminée par mesure expérimentale, ceci peut être expliqué par l'état hydrique du mur.

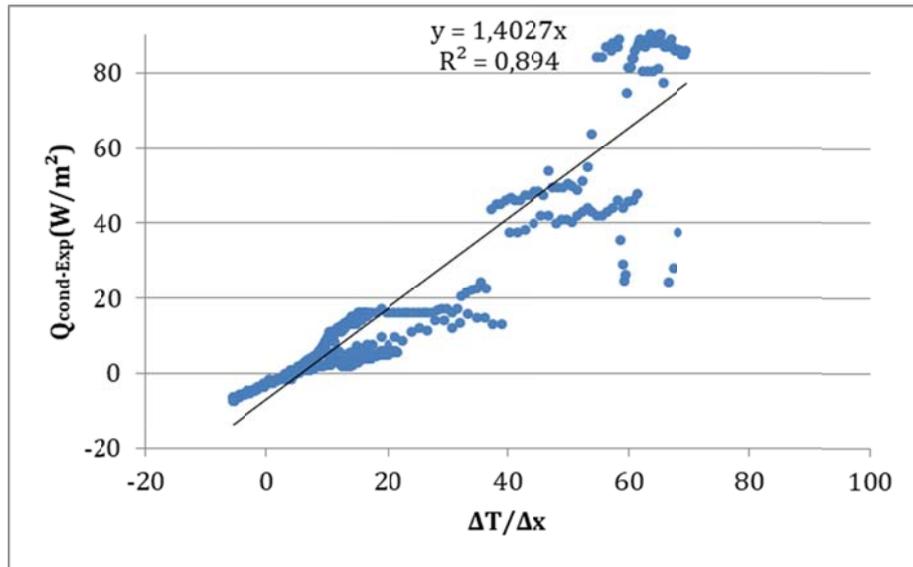


Figure V- 48: Confrontation du flux thermique au gradient de température au bord extérieur  
 Sur le plan massique, on peut voir les oscillations de HR de la paroi dans le temps en réponse à la sollicitation dynamique montrées sur la figure V- 49 et la Figure V-50. Celle-ci est commencée par une période de séchage en effectuant une séance d'enseillement, ce qui affirme la diminution de HR dans la première séquence. Après ça, une oscillation avec une légère augmentation de HR est remarqué du au stockage et le déstockage de la masse d'eau dans la paroi en réponse de la variation de l'humidité aux bords intérieurs et extérieur et aussi aux séances de précipitation appliquées.

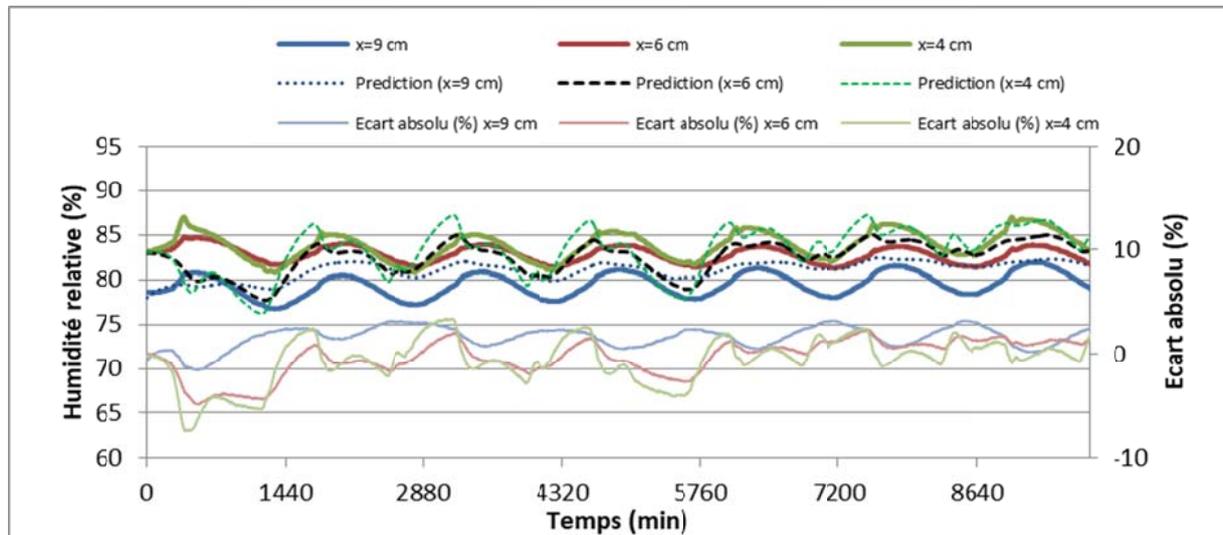


Figure V- 49: Evolution de l'humidité relative dans différentes position  $x=4, 6$  et  $9$ cm

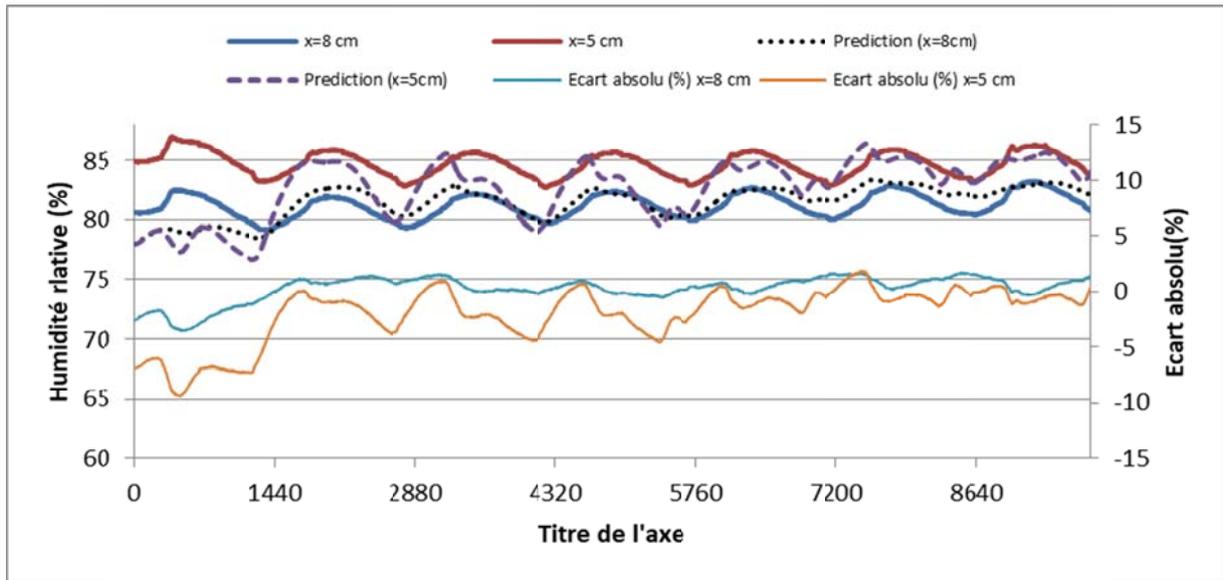


Figure V- 50: Evolution de l'humidité relative dans différentes position  $x=5$  et  $8\text{cm}$

Par ailleurs, les mesures du flux thermique sont effectuées sur le bord extérieur et intérieur (cf. Figure V- 51 et Figure V-52). Le flux thermique simulé est en bonne concordance au flux mesuré. En effet, on note une bonne corrélation entre notre observation expérimentale et les résultats de la simulation numérique cependant on peut voir que le flux simulé au bord extérieur et intérieur est surestimé de 8% et 30% respectivement, que celui mesuré expérimentalement. Cet écart comme cité précédemment peut être attribué en partie au fait que le capteur soit imperméable au transfert de masse. De plus, cette surestimation du flux thermique est due en partie aux écarts notés précédemment sur la température simulée aux bords (Figures V-42 et V-43).

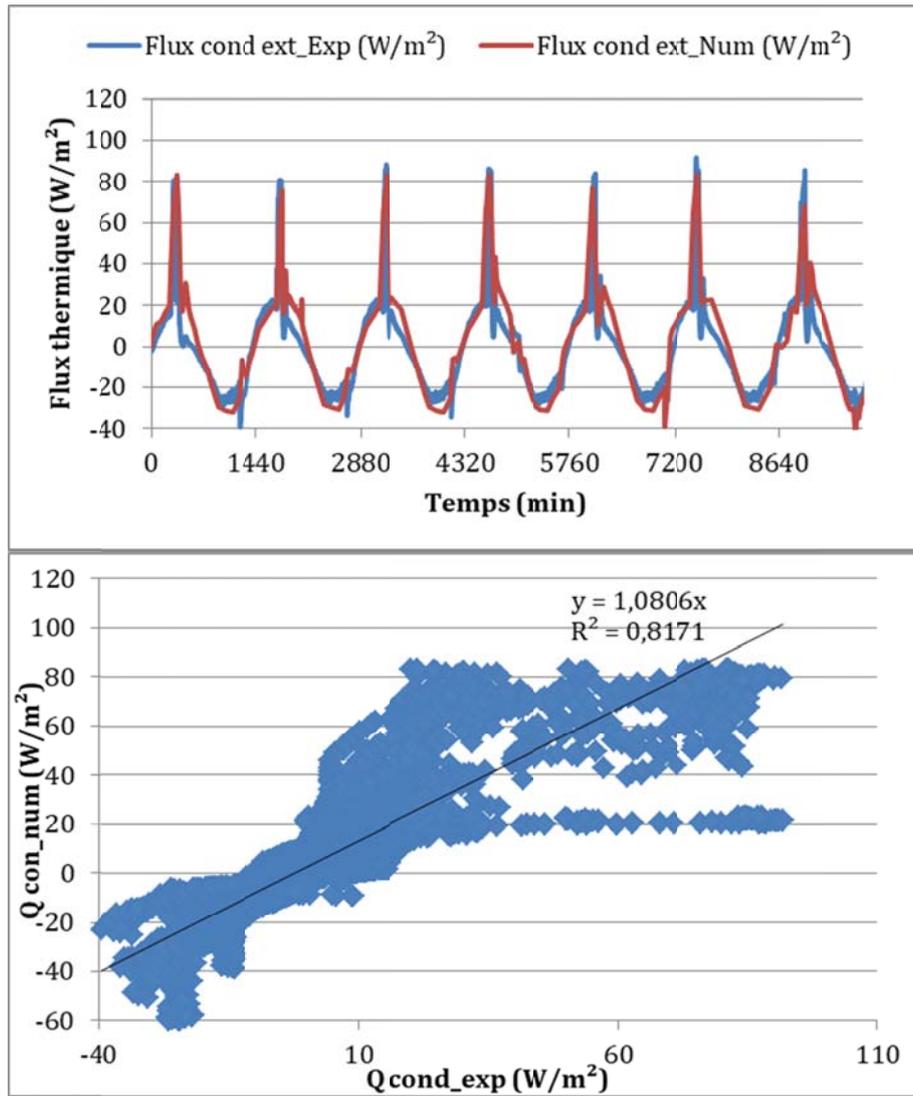


Figure V- 51: Confrontation du flux thermique conduit du modèle de prédiction au flux thermique conduit expérimental au bord extérieur

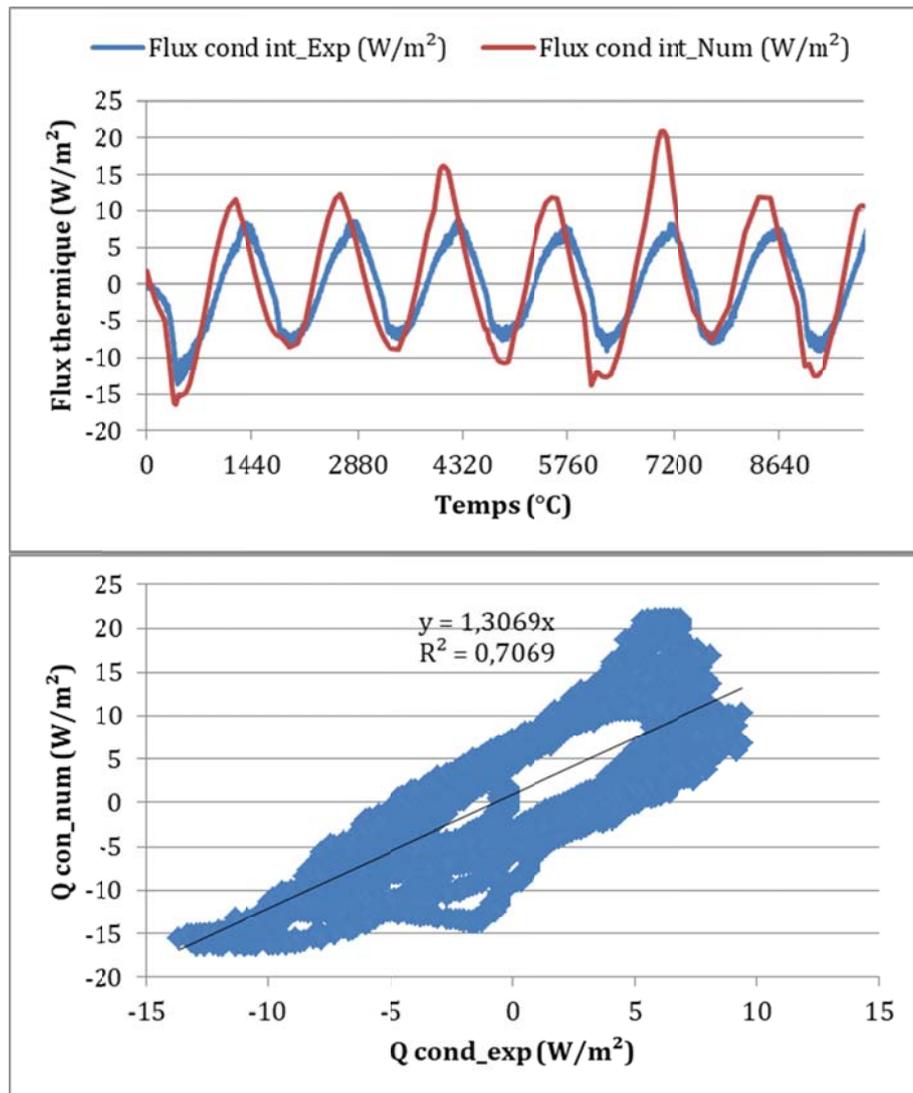


Figure V- 52: Confrontation du flux thermique conduit du modèle de prédiction au flux thermique conduit expérimental au bord intérieur

## V.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le banc expérimental conçu et réalisé au cours de cette thèse pour l'étude du comportement hygrothermique dans les parois du bâtiment. Il s'agit d'un dispositif qui permet la mesure d'un grand nombre de grandeurs notamment en régime dynamique et stationnaire. Sa qualification nous a permis de montrer ses capacités d'isolation et de régulation hygrothermique. On présentera par la suite les résultats réalisés sur ce dispositif. Ces derniers permettent de comprendre les phénomènes de transferts couplés de chaleur et d'humidité.

Par la suite, nous avons présenté le modèle phénoménologique de transfert de masse et de chaleur développé au LaSIE. Ce modèle est fortement couplé et permet de prédire le

comportement hygrothermique des milieux poreux. Il prend en compte le transfert de chaleur régi par la loi de Fourier, le transfert de la phase vapeur d'eau régi par la loi de Fick, le transfert de l'eau liquide d'eau régi par la loi de Darcy et le changement de phase entre la phase vapeur et la phase liquide et vis vers ça. De plus, nous avons suivi une démarche permettant de caractériser trois paramètres matériels de transfert hydrique dans le cas isotherme notamment la capacité hydrique, la perméabilité à la vapeur d'eau et la perméabilité liquide d'eau moyennant une procédure d'identification. Elle consiste à effectuer une mesure simultanée de l'évolution de l'humidité relative due au processus d'imbibition. Ce dispositif expérimental est couplé à un outil d'identification développé capable de traiter plusieurs paramètres d'identification avec une fonctionnelle de minimisation. Le modèle numérique est basé sur un modèle de type diffusion non linéaire incluant deux phénomènes : la perméabilité de l'eau liquide et de la vapeur d'eau. Cette approche expérimentale et numérique couplée permet l'identification des paramètres de l'eau en utilisant la méthode inverse pour alimenter les modèles de prédiction. En effet, les résultats de cette partie sont confrontés avec ceux expérimentaux. Les essais expérimentaux entrepris nous a permis de juger la procédure d'identification.

De ce qui concerne la modélisation numérique et expérimentale de transfert de masse et de chaleur, nous notons que le modèle numérique de transfert hygrothermiques retranscrit bien le comportement hygrothermique vis-à-vis pas qu'aux changements de température et d'humidité mais aussi avec l'application des radiations solaire et les précipitations. Toutefois, ce modèle a montré des lacunes à modéliser le comportement hygrothermique des matériaux poreux plus particulièrement dans le cas des sollicitations dynamiques [30][31][32]. L'origine de ces écarts n'était jusqu'aujourd'hui pas encore bien définie et peut être liée à plusieurs facteurs :

- La résolution numérique (Le choix du maillage adéquat et le schéma de résolution),
- La formulation des modèles phénoménologiques de transferts hygrothermique (la non-prise en compte des phénomènes physiques),
- Comme ça se peut lier à la mesure issue de l'expérience (erreur de capteur et l'impact de l'environnement sur la mesure).

## Références bibliographiques

- [1] M.Y. Ferroukhi, K. Abahri, R. Belarbi, K. Limam, Integration of a hygrothermal transfer model for envelope in a building energy simulation model: experimental validation of a HAM–BES co-simulation approach, *Heat Mass Transf. Und Stoffuebertragung*. 53 (2017) 1851–1861. <https://doi.org/10.1007/s00231-016-1944-9>.
- [2] K. Abahri, R. Belarbi, N.O. B, N. Issaadi, M. Ferroukhi, Total Pressure Gradient Incidence on Hygrothermal Transfer in Highly Porous Building Materials, *Adv. Mater. Res.* 772 (2013) 124–129. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.772.124>.
- [3] M.Y. Ferroukhi, R. Belarbi, K. Limam, Effect of Hygrothermal Transfer on Multilayer Walls Behavior, Assessment of Condensation Risk, *Adv. Mater. Res.* 1051 (2014) 647–655. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1051.647>.
- [4] R. Allam, N. Issaadi, R. Belarbi, M. El-Meligy, A. Altahrany, Hygrothermal behavior for a clay brick wall, *Heat Mass Transf. Und Stoffuebertragung*. (2018) 1–13. <https://doi.org/10.1007/s00231-017-2271-5>.
- [5] M.Y. Ferroukhi, R. Djedjig, K. Limam, R. Belarbi, Hygrothermal behavior modeling of the hygroscopic envelopes of buildings: A dynamic co-simulation approach, *Build. Simul.* 9 (2016) 501–512. <https://doi.org/10.1007/s12273-016-0292-5>.
- [6] H. Janssen, B. Blocken, J. Carmeliet, Conservative modelling of the moisture and heat transfer in building components under atmospheric excitation, *Int. J. Heat Mass Transf.* 50 (2007) 1128–1140. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.06.048>.
- [7] C. Belleudy, M. Woloszyn, M. Chhay, M. Cosnier, A 2D model for coupled heat, air, and moisture transfer through porous media in contact with air channels, *Int. J. Heat Mass Transf.* 95 (2016) 453–465. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.12.030>.
- [8] A. Trabelsi, Z. Slimani, J. Virgone, Response surface analysis of the dimensionless heat and mass transfer parameters of Medium Density Fiberboard, *Int. J. Heat Mass Transf.* 127 (2018) 623–630. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.05.145>.
- [9] M. Nascimento, J. Gonçalves Pereira, G. Alves Lira, V.D.S.F. Dantas, André A. Nobrega, Hygrothermal simulation : Use for service life prediction and maintenance of façade, *Eco-Architecture*. 183 (2019) 139–149. <https://doi.org/doi:10.2495/ARC180131>.
- [10] Y. Cui, J. Xie, J. Liu, P. Xue, applied sciences Experimental and Theoretical Study on the Heat Transfer Coefficients of Building External Surfaces in the Tropical Island Region, (2019). <https://doi.org/10.3390/app9061063>.
- [11] L.A. De Mello, L.M. Moura, N. Mendes, International Journal of Thermal Sciences A model for predicting heat , air and moisture transfer through fibrous materials, *Int. J. Therm. Sci.* 145 (2019) 106036. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.106036>.
- [12] R.A. Pescaru, L. Dumitrescu, I. Baran, C.M. Grădinaru, Comparative Analysis of Hygrothermal Behaviour of the Exterior Walls in Transient Regime, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 586 (2019). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/586/1/012011>.
- [13] E. Barreira, V.P. De Freitas, External thermal insulation composite systems: Critical parameters for surface hygrothermal behaviour, *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2014 (2014).

<https://doi.org/10.1155/2014/650752>.

- [14] L. Li, Q. Meng, L. Zhao, Experimental Study on Heat Transfer through Wall Subjected to Rain in Guangzhou, (2009).
- [15] F. Tariku, E. Iffa, Empirical model for cavity ventilation and hygrothermal performance assessment of wood frame wall systems: Experimental study, *Build. Environ.* 157 (2019) 112–126. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.04.020>.
- [16] M. Rahim, O. Douzane, A.D. Tran Le, G. Promis, T. Langlet, Experimental investigation of hygrothermal behavior of two bio-based building envelopes, *Energy Build.* 139 (2017) 608–615. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.058>.
- [17] M.Y. Ferroukhi, K. Abahri, R. Belarbi, K. Limam, A. Nouviaire, Experimental validation of coupled heat, air and moisture transfer modeling in multilayer building components, *Heat Mass Transf. Und Stoffuebertragung.* 52 (2016) 2257–2269. <https://doi.org/10.1007/s00231-015-1740-y>.
- [18] Z. Slimani, A. Trabelsi, J. Virgone, R.Z. Freire, Study of the hygrothermal behavior of wood fiber insulation subjected to non-isothermal loading, *Appl. Sci.* 9 (2019). <https://doi.org/10.3390/app9112359>.
- [19] H. Rafidiarison, R. Rémond, E. Mougel, Dataset for validating 1-D heat and mass transfer models within building walls with hygroscopic materials, *Build. Environ.* 89 (2015) 356–368. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.03.008>.
- [20] A. V. Luikov, *Heat and mass transfer in capillary-porous bodies*, Pergamon Press. Oxford 1 Édn. (1966).
- [21] J. Fourier, *Théorie analytique de la chaleur*, 1822, Édouard Leroy, « Sur l'intégration des équations de la chaleur », 14 (1897) 379–465.
- [22] H.M. Künzle, *Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components One and two dimensional calculation using simple parameter*, Fraunhofer IRB Verlag. (1995).
- [23] X. Liu, Y. Chen, H. Ge, P. Fazio, G. Chen, Numerical investigation for thermal performance of exterior walls of residential buildings with moisture transfer in hot summer and cold winter zone of China, *Energy Build.* 93 (2015) 259–268. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.02.016>.
- [24] B. Remki, K. Abahri, M. Tahlaiti, R. Belarbi, Hygrothermal transfer in wood drying under the atmospheric pressure gradient, *Int. J. Therm. Sci.* 57 (2012) 135–141. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2012.02.005>.
- [25] V.F. Formalev, E.L. Kuznetsova, Method for solving inverse coefficient problems of heat transfer in anisotropic composite materials, *Compos. Mech. Comput. Appl. An Int. J.* 3 (2012) 215–226. <https://doi.org/10.1615/CompMechComputApplIntJ.v3.i3.20>.
- [26] S. Furmaniak, A.P. Terzyk, P.A. Gauden, G. Rychlicki, Applicability of the generalised d'arcy and watt model to description of water sorption on pineapple and other foodstuffs, *J. Food Eng.* (2007) 718–723.
- [27] ASTM C 1585-04, Standard test method for measurement of rate of absorption of water by hydraulic-cement concretes, *ASTM Int.* (2004) 1–6. <https://doi.org/10.1520/C1585-13.2>.

- [28] D. Lockington, J.-Y. Parlange, P. Dux, Sorptivity and the estimation of water penetration into unsaturated concrete, *Mater. Struct.* 32 (1999) 342–347.  
<https://doi.org/10.1007/BF02479625>.
- [29] B. Schwarz, Heat and material transfer in outdoor wall surfaces., Diss.Universität Stuttgart. (1971).
- [30] I. Traoré, Transferts de chaleur et de masse dans les parois des bâtiments à ossature bois, Thèse de Doctorat, Université de Nancy, 2011, n.d.
- [31] H. M. Rafidiarison, Etudes expérimentales des transferts de masse et de chaleur dans les parois des constructions en bois, en vue de leur modélisation. Applications aux économies d'énergie et au confort dans l'habitat, Thèse de doctorat, RP2E - Ecole Doctorale Sciences et Ingénierie des Ressources, Procédés, Produits, Environnement, France., 2012.
- [32] H. Yoshino, T. Mitamura, K. Hasegawa, Moisture buffering and effect of ventilation rate and volume rate of hygrothermal materials in a single room under steady state exterior conditions, *Build. Environ.* 44 (2009) 1418– 1425.



|  |     |
|--|-----|
| Figure V- 1 : Banc expérimental développé.....   | 138 |
| Figure V- 2 : Le caisson construit de 1,20m x 1,20m x 1,20m .....  | 138 |
| Figure V- 3 : La mise en œuvre de la paroi. (a) le coffrage, (b) le coulage, (c) la paroi après décoffrage.<br>.....                     | 139 |
| Figure V- 4 : L'ensemble du banc expérimental .....  | 141 |
| Figure V- 5 : L'installation de simulateur de pluie .....  | 141 |
| Figure V- 6: L'installation de simulateur du soleil.....   | 142 |
| Figure V- 7 : La disposition des capteurs d'éclairement CLO & GLO (Pyranomètre et Pyrgéomètre)<br>.....                                  | 142 |
| Figure V- 8 : Le capteur AHLBORN FHA 646 R .....   | 143 |
| Figure V- 9: Position des capteurs sur les surfaces et au cœur de la paroi (à gauche surface extérieure,<br>à droite vue en coupe) ..... | 144 |
| Figure V- 10 : Détail du positionnement des capteurs en profil de la paroi (Détail A).....   | 144 |
| Figure V- 11 : La disposition des capteurs T&HR et Capteurs de flux thermique .....  | 145 |
| Figure V- 12 : disposition des capteurs dans la cellule .....  | 145 |
| Figure V- 13 : L'évolution de la température dans la salle et à l'intérieur des deux caissons .....                                      | 146 |
| Figure V- 14 : Le profil de température au sein de la paroi en régime stationnaire .....   | 146 |
| Figure V- 15: Cartographie des flux radiatifs CLO & GLO sur une maille de 5 X 5 .....  | 148 |
| Figure V- 16: Le banc expérimental.....  | 154 |
| Figure V- 17 : La procédure entreprise .....   | 157 |
| Figure V- 18 : L'algorithme de minimisation .....  | 158 |
| Figure V- 19 : La capacité de stockage hydrique (Entrés en traits continus, sortis en traits discontinus)<br>.....                       | 161 |
| Figure V- 21 : La conductivité de vapeur d'eau (Entrés en traits continus, sortis en traits discontinus)<br>.....                        | 162 |
| Figure V- 22: La perméabilité liquide d'eau (a), la perméabilité à la vapeur d'eau (b) et le rapport entre<br>les deux (c) .....         | 163 |
| Figure V- 23: Evolution de l'humidité relative au sein du matériau à 2,5 cm de profondeur en fonction<br>du temps .....                  | 164 |
| Figure V- 24: Accumulation d'eau absorbée.....   | 165 |
| Figure V- 25: La variation de température et de l'humidité relative dans le caisson A .....  | 167 |
| Figure V- 26: La variation de température et de l'humidité relative dans le caisson B .....  | 168 |
| Figure V- 27: Évolution de la température sur le bord extérieur.....   | 170 |
| Figure V- 28: Évolution de l'humidité relative sur le bord extérieur.....  | 170 |
| Figure V- 29: Évolution de la température sur le bord intérieur .....  | 171 |
| Figure V- 30: Évolution de l'humidité relative sur le bord intérieur.....  | 171 |
| Figure V- 31: Évolution de la température dans la zone 1 à différentes position x=4, 6 et 9 cm .....                                     | 172 |
| Figure V- 32: Évolution de la température dans la zone 2 à différentes position x=5 et 8 cm .....  | 172 |
| Figure V- 33: Évolution de la température dans la zone 3 à différentes position x= 6 et 10 cm .....                                      | 173 |
| Figure V- 34: Évolution de l'humidité relative dans la zone 1 à différentes position x=4, 6 et 9 cm. 173                                 |     |
| Figure V- 35: Évolution de l'humidité relative dans la zone 2 à différentes position x=5 et 8 cm..... 174                                |     |
| Figure V- 36: Évolution de l'humidité relative dans la zone 3 à différentes position x= 6 et 10 cm.. 174                                 |     |
| Figure V- 37: Sollicitation de température dans le caisson A .....   | 175 |
| Figure V- 38: Variation de l'humidité relative dans le caisson A .....   | 175 |
| Figure V- 39: Le flux radiation et de pluie infiltrée dans le mur (face extérieure) .....  | 176 |
| Figure V- 40: Evolution de la température dans le caisson intérieur .....  | 176 |

|   |     |
|---|-----|
| Figure V- 41: Evolution de l'humidité relative dans le caisson intérieur.....   | 177 |
| Figure V- 42: Evolution de la température dans le bord extérieur.....   | 178 |
| Figure V- 43: Evolution de l'humidité relative dans le bord extérieur.....  | 178 |
| Figure V- 44: Evolution de la température dans le bord intérieur.....   | 179 |
| Figure V- 45: Evolution de l'humidité relative dans le bord intérieur.....  | 179 |
| Figure V- 46: Evolution de la température dans différentes position x=4, 6 et 9cm.....  | 180 |
| Figure V- 47: Evolution de la température dans différentes position x=5 et 8cm.....   | 180 |
| Figure V- 48: Confrontation du flux thermique au gradient de température au bord extérieur.....   | 181 |
| Figure V- 49: Evolution de l'humidité relative dans différentes position x=4, 6 et 9cm.....   | 181 |
| Figure V- 50: Evolution de l'humidité relative dans différentes position x=5 et 8cm.....  | 182 |
| Figure V- 51: Confrontation du flux thermique conduit du modèle de prédiction au flux thermique conduit expérimental au bord extérieur..... | 183 |
| Figure V- 52: Confrontation du flux thermique conduit du modèle de prédiction au flux thermique conduit expérimental au bord intérieur..... | 184 |

|  |     |
|--|-----|
| Tableau V- 1: Les caractéristiques techniques des capteurs hygrothermiques AHLBORN FHA 646 R.....                        | 143 |
| Tableau V- 2 : les propriétés du matériau étudié.....  | 153 |
| Tableau V- 3 : Paramètres donnés à priori sélectionnés et paramètres de modèle d'humidification identifiés (sortie)..... | 160 |
| Tableau V- 4 : Coefficients d'échange massique et convectif.....   | 169 |

## **Modélisation expérimentale et numérique de transfert de masse et de chaleur**

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| V.1   | Introduction.....  | 136 |
| V.2   | La mise en place de la plateforme expérimentale.....                                 | 137 |
| V.2.1 | Description du banc.....   | 138 |
| V.2.2 | La mise en œuvre de la paroi.....  | 139 |
| V.2.3 | Régulation en Température T et humidité relative HR.....                             | 140 |
| V.2.4 | Simulateur de pluie.....   | 141 |
| V.2.5 | Simulateur d'ensoleillement.....   | 142 |
| V.2.6 | Autres capteurs et acquisition associée.....   | 143 |
| V.2.7 | Qualification du banc.....   | 145 |
| V.3   | Modèle mathématique de transfert de masse et de chaleur dans les milieux poreux..... | 148 |
| V.3.1 | Formulation mathématique.....  | 149 |
| V.3.2 | Bilan massique.....  | 149 |

|        |   |     |
|--------|---|-----|
| V.3.3  | Bilan énergétique.....  | 151 |
| V.3.4  | Les conditions aux limites.....   | 152 |
| V.3.5  | Résolution numérique.....   | 152 |
| V.3.6  | Paramètres d'entrée du modèle.....  | 153 |
| V.4    | Identification des propriétés de transfert hydrique via la méthode inverse..... | 153 |
| V.4.1  | Modèle numérique.....   | 154 |
| V.4.2  | Matériel et méthodes expérimentales.....  | 154 |
| V.4.3  | Résolution numérique du problème direct.....                                    | 154 |
| V.4.4  | Formulation adimensionnelle.....  | 155 |
| V.4.5  | Discrétisation temporelle.....  | 155 |
| V.4.6  | Discrétisation spatiale.....  | 156 |
| V.4.7  | La procédure de minimisation.....   | 156 |
| V.4.8  | Résolution numérique.....   | 159 |
| V.4.9  | Effet des paramètres initiaux.....  | 159 |
| V.4.10 | Confrontation des résultats de minimisation.....                                | 163 |
| V.5    | Essais à l'échelle de la paroi et simulation numérique.....                     | 165 |
| V.5.1  | Essai sous sollicitation de type échelon.....                                   | 166 |
|        | Tableau V- 4 : Coefficients d'échange massique et convectif.....                | 169 |
| V.5.2  | Test de précipitation et radiation.....   | 174 |
| V.6    | Conclusion.....   | 184 |

## Conclusion générale et perspectives

Lors de ce travail de doctorat, une investigation a été organisée autour de deux parties dans le but principal d'améliorer la prédiction des réponses mécanique et thermo hydriques des matériaux innovants et de mieux appréhender l'impact des conditions aux limites réelles et réalistes sur les transferts hygrothermiques.

Dans un premier temps, nous avons dressé une synthèse bibliographique synthétisant l'état de l'art existant dans la littérature, constituant le premier chapitre, qui porte sur la présentation des nouveaux matériaux dites « FGM ». C'est matériaux innovons sont issus du malaxage de plusieurs matériaux moyennant différents modes de fabrication. Elles constituent la matière de l'avenir qui offre des possibilités d'études et d'applications supplémentaires. Toutefois, peu études expérimentales sont menées dans ce domaine et il n'y a que très peu d'implémentations pratiques jusqu'à présent, même si les exemples naturels sont nombreux. La nature coûteuse de ces matériaux constitue également un obstacle à son développement. D'autres études devraient permettre d'améliorer encore l'acceptabilité et l'application des FGM.

Par conséquent, Les modèles de prédiction du comportement mécanique et thermo hydrique de ce type de matériau, et qui ont été recensés dans cette recherche bibliographique sont basés sur la détermination du champ de déplacement, prenant en compte le phénomène de gauchissement da la section transversale afin de mieux prédire le comportement mécanique.

Dans un second temps, des études comparatives entre plusieurs modèles ainsi qu'une étude paramétrique ont été entrepris en faisant varier plusieurs paramètres dimensionnels (rapport d'aspect), matériels (indices matériels) et le type d'appui (simplement appuyé ou sur fondation élastique). Ces investigations nous a permis de bien choisir le modèle de prédiction qui représente fidèlement et de manière correcte le comportement mécanique en tenant en compte du chargement thermique et hydrique. Elles ont mis en évidence le comportement mécanique prédis des matériaux FGM moyennant un modèle de prédiction à quarte variable, comparé avec d'autres modèles à cinq et six variables. En effet, le présent modèle présente des avantages non seulement à la meilleure prédiction, mais aussi en termes de temps de calcul, l'exactitude et sa simplicité. Par ailleurs, ces résultats nous a permis de pré-dimensionner les structures en ce types de matériaux pour chaque cas d'étude.

Le troisième chapitre a été consacré à présenter un état de l'art de nouveaux éco-matériaux. Nous avons mis en point la nécessité de réduire l'empreinte carbone du bâtiment dans la nature, en essayant de réduire le taux de clinker dans les bétons. Par la suite, nous avons mis en exergue le problème du manque de données quant aux propriétés thermiques et hydriques de ce type de nouveaux matériaux qui constituent des indicateurs de durabilité. Par la suite, nous avons présenté les différents modèles de prédiction hygrothermiques, existant dans la littérature, leurs développements, et leurs paramètres d'entrées. En dernier, nous avons présenté ainsi les différents bancs expérimentaux dédiés à la validation des modèles de prédiction de transfert de masse et de chaleur.

Le quatrième chapitre, nous avons palier au problème de manques de propriétés des éco-bétons. Pour ce faire, nous avons réalisé une caractérisation fine de la microstructure, les propriétés du béton à l'état frais, les propriétés physiques, mécaniques, thermiques et hydriques. Cependant, la substitution du ciment par la poudre de verre dans le béton a montré des résultats très prometteurs.

En effet, en termes de maniabilité, la poudre de verre a amélioré la rhéologie du béton. Sur ce qui concerne la résistance mécanique, l'effet de la poudre de verre se représente à long terme de cure. Après 91 jours, les éco-bétons présentent une amélioration de cette propriété qui varie de 5% à 10% par rapport aux résultats à 28 jours, cela est expliqué par la réaction pouzzolanique entre la portlandite  $\text{CaOH}_2$  présente dans la matrice cimentaire et la silice de la poudre de verre pour former des nouveaux hydrates C-S-H. Ces derniers sont examinés par une caractérisation de la microstructure, notamment les imageries au microscope électronique à balayage (MEB) et l'analyse thermogravimétrique ATG. En effet, nous y trouvons une perte de 1% de la portlandite des éco-bétons.

En outre, de ce qui concerne la conductivité thermique, l'éco-béton a présenté une diminution qui peut aller jusqu'à 30% tout en allégeant la densité propre du béton. En plus, l'effet la poudre de verre sur les propriétés hydrique se manifeste en amélioration qui peut aller à 60% de la capacité hydrique liée et 5 fois mieux en termes de la perméabilité à la vapeur d'eau. Cela est fortement relié au changement de la microstructure, notamment la distribution de pores, on y retrouve l'apparition dans les éco-bétons des nouvelles gammes de pores d'ordre  $0.005\mu\text{m}$  et  $0.5\mu\text{m}$  comparé au béton de référence. Les résultats de ce chapitre consacré à l'étude hygrothermique constituent les données d'entrée du modèle numérique simulant le transfert hygrothermique dans les éco-bétons. Ce dernier montra l'intérêt de l'utilisation de ces

éco-matériaux en termes de performance énergétique, de durabilité et d'impacts environnementaux.

Dans le cinquième chapitre, une nouvelle plateforme expérimentale a été présentée. Elle a été conçue dans le but d'étudier le comportement hygrothermique d'une paroi de bâtiment. Elle permet d'introduire des conditions climatiques réelles, notamment la précipitation et les radiations solaires. Cela a permis de mettre l'accent sur l'importance des conditions aux limites réelles dans la modélisation expérimentale. Par la suite, un modèle phénoménologique des transferts de chaleur et d'humidité dans les parois de bâtiment a été proposé. La température, la pression de vapeur d'eau ont été choisies respectivement comme moteurs de transfert thermique, hydrique. Ce choix a été entrepris afin de pouvoir confronter nos résultats numériques avec ceux expérimentaux.

D'un autre côté, le modèle de transfert de chaleur, et d'humidité élaboré prend en considération la variation des propriétés hydriques en fonction de l'état hydrique des matériaux, notamment la perméabilité à la vapeur d'eau, la perméabilité liquide d'eau et la capacité de stockage d'humidité pour le transfert hydrique. Ces derniers sont estimés suivant une démarche permettant de caractériser trois paramètres matériels moyennant une procédure d'identification. Elle consiste à faire un essai d'absorption capillaire et effectuer une mesure de profil d'humidité simultanée d'un échantillon. Ce dispositif expérimental est couplé à un outil d'identification développé capable de traiter plusieurs paramètres avec une fonctionnelle de minimisation. Le modèle numérique est basé sur un modèle de type diffusion non linéaire incluant deux phénomènes : la diffusion de l'eau liquide et de la vapeur d'eau. Cette approche expérimentale et numérique couplée permet l'identification des paramètres via la méthode inverse pour alimenter le modèle de prédiction choisi au préalable. Après identification, nous avons confronté les résultats trouvés avec ceux expérimentaux issus d'autres expériences sur d'autres échantillons. Nous avons trouvé une bonne concordance entre les deux résultats.

Sur le volet de modélisation numérique et expérimentale de transfert de masse et de chaleur,

## Proposition d'une nouvelle formulation mathématique pour l'analyse du comportement hydro thermo mécanique des structures fonctionnellement graduées

### Résumé :

Ces dernières décennies ont connu l'émergence de nouvelles exigences et enjeux énergétiques et environnementaux donnant naissance à de multiples réflexions dans le secteur de la construction des bâtiments (neufs et anciens). Elles ont trait, notamment, au développement des éco-matériaux de construction innovants et durables. Afin de pallier à ces problématiques, de nombreux travaux de recherche et de développement ont vu le jour. Parmi ces derniers, se trouve la substitution du ciment par d'autres alternatives non-biodégradables. Cette voie prometteuse permet de : (i) réduire considérablement l'empreinte environnementale, (ii) préserver les ressources naturelles, et (iii) diminuer le coût global de la construction. La littérature fait état des travaux récents dans ce domaine dédiés aux aspects mécanique et de durabilité de ces éco-matériaux à base de verre recyclé. Néanmoins, leur comportement hydrique et thermique reste très peu voire pas du tout abordé.

Dans le cadre du travail de thèse, l'influence de l'incorporation de la poudre de verre, et d'additions minérales, dont la fumée de silice sur les propriétés mécaniques, microstructurales, hydriques et thermiques a été entreprise. Ces investigations expérimentales ont mis en évidence qu'une substitution massive du ciment par 20% et 30% du verre diminue légèrement la résistance mécanique du béton qui prend des valeurs allant de 30 à 40 MPa. Néanmoins, ces valeurs demeurent suffisantes pour une utilisation de ces éco-bétons dans la construction. En outre, l'incorporation du verre dans le béton améliore ces propriétés thermiques et augmente la capacité de stockage d'humidité.

Par ailleurs et dans l'optique de simuler les transferts couplés de chaleur et d'humidité au sein des matériaux d'enveloppe de bâtiment, constitués de ces éco-bétons, une modélisation numérique a été développée. Outre la prise en compte des mécanismes de transferts dominants de chaleur et de masse, les radiations solaires et des scénarii de précipitations ont été considérées. Les paramètres de transferts ont été évalués par une méthode inverse tout en réduisant le temps de caractérisation. Par la suite, la validation expérimentale du modèle élaboré a été effectuée moyennant la conception et la réalisation d'une plateforme expérimentale: au laboratoire LaSIE capable de d'étudier la réponse d'une paroi de bâtiment ( $1.3 \times 1.3 \text{ m}^2$ ) à des sollicitations climatiques réaliste. Ces dernières ont été rendues possible d'une part grâce à l'incorporation des simulateurs d'ensoleillement et de précipitation et d'autre part via une instrumentation permettant le suivi des profils spatio-temporels de la température et de l'hygrométrie au sein du matériau d'enveloppe et au niveau de l'ambiance intérieure du bâtiment.

La confrontation des résultats numériques et ceux issue de la campagne expérimentale a permis de mettre en évidence l'aptitude du modèle numérique à simuler le comportement hygrothermique des parois d'enveloppes soumises à des sollicitations dynamiques variable et réaliste.

Enfin, une autre typologie des éco-bétons a été étudiée par l'intermédiaire d'une approche de modélisation théorique, Il s'agit de matériaux innovants ayant des propriétés adaptées et fonctionnellement graduées « FGM ». L'élaboration de ces matériaux est réalisable moyennant des nouvelles techniques d'impression 3D, conception des dépôts par fusion FDM, et la stéréolithographie SLA. Sur le plan théorique, l'influence des contraintes hygrothermiques sur la réponse mécanique est souvent négligée. Le couplage de ces contraintes de Piola-Kirchhoff avec le modèle mécanique de Green-Lagrange a permis de mieux appréhender le comportement des structures en FGM.

**Mots clés :** Caractérisation des éco-bétons, béton à base de poudre de verre, modélisation numérique des transferts hygrothermiques, plateforme expérimentale à l'échelle de la paroi, validation expérimentale, matériaux fonctionnellement gradués FGM.

