

Caractérisation et modélisation de l'effet du séchage sur la fissuration d'une couche mince de mortier

Joachim Monge

LMT (Laboratoire de Mécanique et Technologie) Cachan, Secteur Génie Civil et Environnement – ENS de Cachan – 61 Avenue du Président Wilson 94235 Cachan

RESUME. Les mortiers industriels tels les chapes ou les enduits de façades peuvent être assujettis, dès leurs plus jeunes âges, à des conditions aux limites très pénalisantes en terme de température, humidité ou blocage mécanique. L'action de ces paramètres, pendant le durcissement du matériau, conduit bien souvent à une fissuration par retrait empêché lorsque la contrainte induite dépasse la limite de résistance en traction du matériau. Le but de cette étude est de caractériser expérimentalement le comportement d'un mortier vis à vis de la fissuration en utilisant le dispositif de retrait empêché à l'anneau et en l'adaptant à des couches minces. Ceci nous a donné l'occasion d'étudier l'effet du séchage en décoffrant le matériau à plusieurs échéances (1, 2, 3 et 7 jours). Des macro fissures ont été observées sur les mortiers décoffrés à 2, 3 et 7 jours. Ces fissures semblent apparaître d'autant plus rapidement que le matériau est décoffré tardivement, laissant à penser qu'il existe un fort couplage au jeune âge entre hydratation et séchage. Une modélisation par éléments finis basée sur le couplage de ces deux phénomènes a permis de valider le comportement macroscopique du mortier en terme de perte en masse.

MOTS-CLÉS : Mortier, Séchage, Fissuration

ABSTRACT. Industrial mortars used in screed or coating applications may be exposed to severe conditions of temperature, relative humidity or mechanical blocking at early age. In many case, cracking occurs because the tensile stress generated by the restraining support exceeds the strength of the material. The aim of this study is to characterize the cracking behaviour of thin layer of mortars by using the restrained shrinkage device called: the ring test. We investigated the effect of beginning of drying at four different ages: 1, 2, 3 and 7 days. We observed that the later the mortar is demoulded, the earlier macro-cracking occurs. Competition between hydration and drying can explain such a phenomenon. Macroscopic modelling based on such a coupling allowed us to validate the mortar behaviour in term of weight loss.

KEYWORDS: Mortar, Drying, Cracking

1. INTRODUCTION

Les matériaux cimentaires en général subissent des changements volumiques intrinsèques importants au jeune âge, qui sont liés à leurs compositions (retrait endogène) ou aux conditions climatiques extérieures (retrait de dessiccation). Lorsque le retrait du matériau est restreint par son support, il peut conduire à une macro fissuration localisée lorsque les contraintes de traction générées dépassent la limite de résistance en traction du matériau.

L'essai sur anneau instrumenté permet de contrôler simplement les déformations et les contraintes dans un anneau de mortier jusqu'à la fissuration en s'affranchissant des problèmes de frottement ou de connexion avec le dispositif de chargement. Il a été adapté pour des couches minces afin de caractériser le comportement d'un mortier soumis au séchage à diverses échéances. Des essais de

retrait libre, de perte en masse et de module d'Young dynamique sur éprouvettes linéiques ont été également réalisés. La cinétique d'hydratation du mortier a été identifiée par calorimétrie semi-adiabatique. Une modélisation Chimio-Hydro-Mécanique développée au laboratoire (Haouas, 2007), implantée dans le code éléments finis Cast3M, basée sur une loi d'hydro-activation, a été utilisée afin d'identifier les cinétiques de perte en masse du mortier soumis aux mêmes conditions de séchage.

2. CARACTERISATION EXPERIMENTALE ET IDENTIFICATION DE L'EFFET DU SECHAGE SUR LE RETRAIT ET LA FISSURATION D'UN MORTIER

2.1. MATERIAUX UTILISES

Pour cette étude, nous disposons d'une composition de mortier auto-nivellant dont la formule est donnée dans le tableau 1.

Composants	Composition (à la tonne)
Ciment CEM I HTS 52,5 R	200 kg
Filler calcaire (D50% = 6,5 μ m)	150 kg
Sable 0,1/0,35 mm	650 kg
Ether de cellulose (MHPC)	1 kg
Superplastifiant (polycarboxylate)	4 kg
Rapport E/C	0,8

Tableau 1 : Composition du mortier.

2.2. METHODES

La fissuration par retrait empêché est caractérisée grâce à l'essai à l'anneau dont un schéma et une photo sont présentés dans la figure 1. L'essai consiste à couler une couche mince de mortier de 10 mm d'épaisseur autour d'un anneau en laiton. Ainsi, l'éprouvette de mortier produit des déformations orthoradiales de part son propre retrait, qui sont mesurées à travers l'anneau en laiton par le biais de 2 jauges de déformations. Les dimensions de cet anneau (2 mm d'épaisseur, 40 mm de hauteur et 300 mm de diamètre) ont été optimisées afin d'exercer un blocage partiel du retrait, tout en enregistrant suffisamment de déformation de l'anneau métallique et en ayant un état de contrainte uniforme dans tout l'échantillon. Cet état de contrainte dans le mortier est calculable simplement à partir de la déformation de l'anneau en laiton en connaissant sa rigidité théorique K (Hossein *et al.*, 2004).

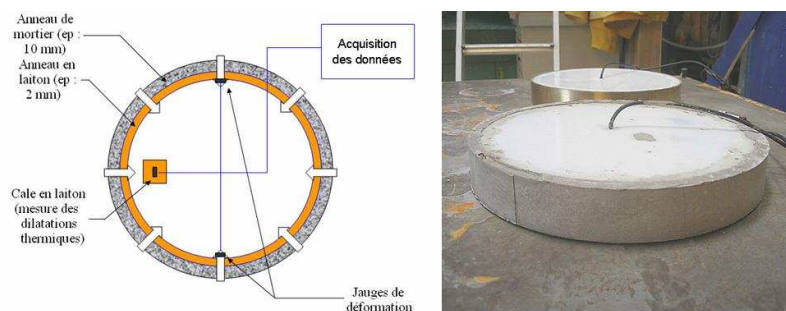


Figure 1: Schéma simpliste de l'essai et photo de l'éprouvette coulée autour de l'anneau en laiton.

Des éprouvettes de dimensions 20 x 40 x 160 mm reproduisant les conditions de séchage de l'anneau permettent un suivi en parallèle du retrait libre (mesuré entre 2 plots par des capteurs LVDT),

de la perte en masse et du module d'Young dynamique mesuré par des transducteurs ultrasonores. Des essais de calorimétrie semi adiabatique ont permis d'identifier la chaleur d'hydratation de notre mortier dans un premier temps, de déterminer le degré d'avancement de la réaction d'hydratation noté ξ et enfin d'identifier l'affinité chimique normalisée $\tilde{A}(\xi)$ de notre matériau. Toutes les éprouvettes ont été conservées dans une chambre climatique à 20°C et 65% d'humidité relative. Le calorimètre est également placé dans cette chambre afin de déterminer son coefficient de déperdition thermique à 20°C. Avant séchage, les éprouvettes sont protégées par un film de polyane, garantissant une humidité relative proche de 100%.

2.3. ESSAIS A L'ANNEAU

Plusieurs essais à l'anneau ont été réalisés afin d'étudier l'effet du séchage à différentes échéances de décoffrage. Les courbes sont présentées dans la figure 2.

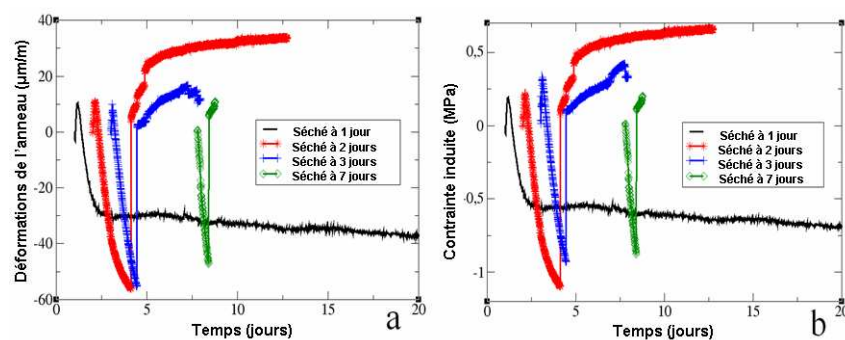


Figure 2 : a : Déformations de l'anneau en laiton au cours du temps, b : Contrainte induite dans le mortier au cours du temps.

On remarque que le mortier décoffré à 1 jours ne fissure pas au bout de 20 jours. Les déformations et les contraintes se stabilisent et évoluent faiblement. On considère que le mortier a un bon comportement si aucune macro-fissure n'apparaît au bout de 2 semaines grâce à des résultats obtenus sur des mortiers industriels. Lorsque le mortier est décoffré plus tard, à 2, 3 ou 7 jours, on constate à chaque fois une fissuration, illustrée par un brutal relâchement de la contrainte, qui se produit d'autant plus tôt que le mortier est décoffré tardivement. Cette tendance est mise en évidence dans la figure 3 qui présente le temps de fissuration en fonction du début de séchage pour 3 essais.

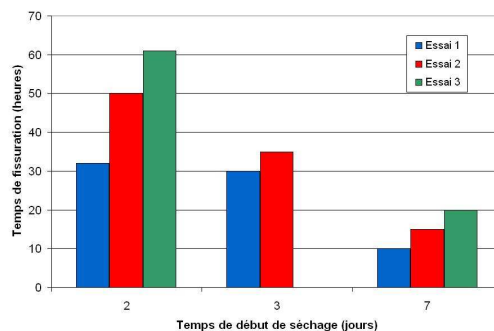


Figure 3 : Histogramme représentant le moment où apparaît la fissure en fonction du début de séchage pour 3 essais.

La dispersion des résultats est importante lorsque le mortier est décoffré à 2 jours. Cependant, la diminution de cette dispersion pour les deux autres échéances révèle une tendance significative.

Un tel comportement peut être expliqué par le ralentissement des cinétiques d'hydratation, provoqués par le séchage brutal du mortier au jeune âge. Un mortier séché rapidement serait alors plus poreux et les effets capillaires en seraient diminués. Dès lors, il devient intéressant de suivre les pertes en masses et le retrait libre afin de mettre en évidence ce couplage entre hydratation et séchage.

2.4. SUIVI DES PERTES EN MASSES, DU RETRAIT LIBRE ET DU MODULE D'YOUNG DYNAMIQUE

Les courbes de perte en masse et de retrait libre sont présentées en figure 4 (a, b). Les résultats sont la moyenne des valeurs obtenues pour 3 éprouvettes. La dispersion des résultats ainsi que l'erreur liée à la mesure donnent des écarts de 0,5% pour la perte en masse et de 100µm/m environ pour le retrait.

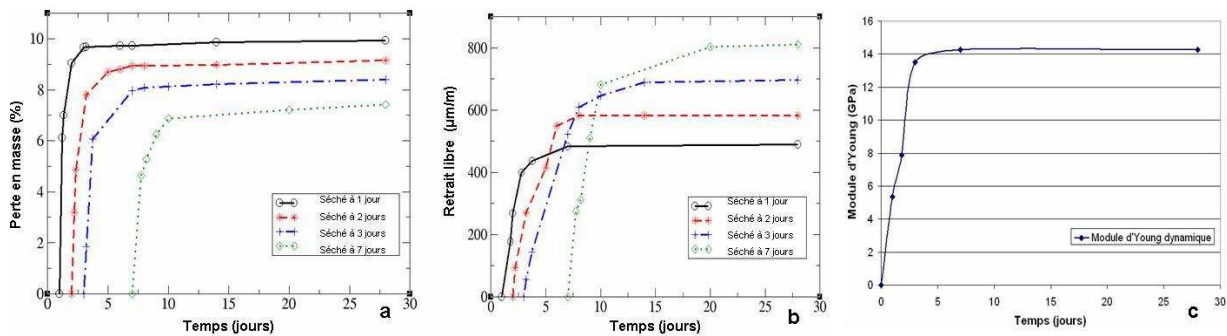


Figure 4 : a : Perte en masse au cours du temps mesurée sur éprouvettes 20x40x160 mm séchées à diverses échéances, b : retrait libre au cours du temps mesuré sur éprouvettes 20x40x160 mm séchées à diverses échéances, c : Evolution du module d'Young.

Les résultats de perte en masse obtenus confirment que le degré d'hydratation des éprouvettes séchées plus tardivement doit être plus important. D'un autre côté, le retrait libre de ces éprouvettes est conséquent, il passe quasiment du simple au double entre une éprouvette séchée à 1 jour et une autre séchée à 7 jours. L'hypothèse du fort couplage entre hydratation et séchage pour notre mortier à fort E/C est à nouveau confirmée par son comportement hygroscopique.

Le module d'Young dynamique a été déterminé par des mesures de vitesses d'ondes longitudinales et transversales au travers d'une éprouvette 40x40x160 mm protégée du séchage par de l'aluminium. En faisant l'hypothèse que le matériau est homogène et isotrope, on peut calculer E de la manière suivante : [Eq. 2]

$$E = \rho V_t^2 \left(\frac{3V_l^2 - 4V_t^2}{V_l^2 - V_t^2} \right) \quad [\text{Eq. 2}]$$

Avec ρ la masse volumique de notre mortier égale à 1850 kg/m³, V_l et V_t respectivement les vitesses d'ondes longitudinales et transversales traversant l'éprouvette.

Les résultats sont exposés en figure 4c.

2.5. CALORIMETRIE SEMI ADIABATIQUE

Des essais de calorimétrie semi adiabatique ont permis d'identifier la chaleur d'hydratation du mortier ainsi que sa cinétique d'hydratation. La chaleur d'hydratation Q (J) se déduit de l'élévation de température θ (°C) mesurée dans le calorimètre à l'aide d'un thermocouple :

$$Q = \frac{C}{m_c} \theta + \frac{1}{m_c} \int_0^t \alpha \cdot \theta \cdot dt \quad [\text{Eq. 3}]$$

Avec m_c (g), la masse de ciment contenu dans l'éprouvette. C (J/°C), la capacité thermique totale du calorimètre et de l'éprouvette et α (J/h.°C), le coefficient de déperdition thermique totale du calorimètre. Plus de détails sur ce type d'essais pourront être trouvés dans la norme NF P 15-436. Nous exprimons le degré d'avancement de la réaction ξ comme le rapport entre $Q(t)$ (J/m³) et $Q_{\max}$ à la fin de l'essai. Ainsi, l'affinité chimique normalisée $\tilde{A}(\xi)$ est déduite simplement en dérivant ξ à partir de la loi d'Arrhenius donné en [Eq.4].

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = \tilde{A}(\xi) \cdot \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad [\text{Eq. 4}]$$

E_a est l'énergie d'activation exprimée en J/mol et R est la constante des gaz parfaits prise égale à 8,314 J/mol.K. Pour cette étude, nous considérons le rapport E_a/R prit égal à 4000 K compte tenu du ciment utilisé (Waller, 2001)

On peut également exprimer le degré d'hydratation comme :

$$\alpha = \xi \cdot \alpha_{\infty} \quad [\text{Eq. 5}]$$

Avec α_{∞} , le degré d'hydratation à l'infini définit comme le rapport entre la chaleur d'hydratation totale et la chaleur d'hydratation pour une hydratation complète théorique.

Afin d'implanter numériquement l'affinité déterminée expérimentalement, nous avons utilisé une expression analytique trouvée dans (Lackner *et al.*, 2004) :

$$\tilde{A}(\xi) = a \frac{1 - \exp(-b\xi)}{1 + c\xi^d} \quad [\text{Eq. 6}]$$

Les quatre paramètres sont déterminés par identification grâce à la méthode des moindres carrées. Les résultats sont donnés dans la figure 5.

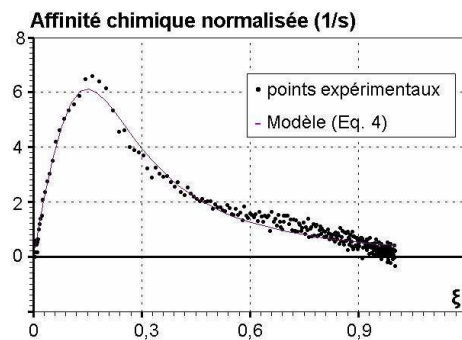


Figure 5 : Affinité chimique normalisée déterminée par calorimétrie semi-adiabatique et estimation par la fonction donnée dans [Eq. 4].

2.6. DETERMINATION DE L'ÉVOLUTION DE LA POROSITÉ AU COURS DE L'HYDRATATION PAR INTRUSION DE MERCURE

Afin de déterminer l'évolution de la porosité au cours du temps, des échantillons ont été préparés à différents stades d'hydratation (1, 2, 3 et 7 jours). La technique de lyophilisation a été utilisée afin de stopper le processus d'hydratation de manière rapide et en modifiant le moins possible la microstructure des échantillons. Elle consiste à plonger le matériau dans de l'azote liquide à -195°C environ, puis de le placer sous vide à -53°C afin de sublimer l'eau contenue dans les pores.

Afin de modéliser l'évolution de la distribution de taille des pores et de l'implanter dans le modèle, nous avons utilisé le modèle phénoménologique introduit par (Haouas, 2007) dans sa thèse. Celui-ci permet de calculer la fonction de distribution des tailles de pores à partir de 3 paramètres identifiés sur nos essais. Il nous permettra par la suite de modéliser le retrait de notre mortier en utilisant la loi de Kelvin-Laplace.

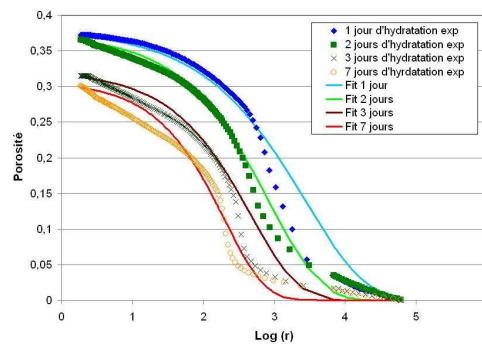


Figure 6 : Evolution de la distribution des tailles de pores au cours de l'hydratation.

On observe une diminution de la porosité totale au cours de l'hydratation sur la courbe de porosité cumulée en fonction du logarithme des rayons de pores représentée en figure 6. Cette valeur est tout de même assez élevée et comprend une part importante d'air entraîné (14% mesuré sur le mortier frais).

3. MODELISATION DU COMPORTEMENT MACROSCOPIQUE DU MORTIER

Afin de rendre compte du comportement macroscopique de notre mortier en terme de perte de masse, nous avons poursuivi l'approche introduite par (Haouas, 2007) dans sa thèse.

3.1. COUPLAGE ENTRE HYDRATATION ET SECHAGE

On propose de modéliser le couplage entre hydratation et séchage par une loi d'hydro-activation. Pour cela, on se base sur le concept d'affinité chimique de la loi d'Arrhenius définie dans l'équation [Eq. 4], en lui ajoutant un terme lié à la consommation de l'eau libre, sorte d'affinité hydrique. Ainsi, la consommation d'eau par séchage influe sur la cinétique d'hydratation comme il est décrit dans l'équation suivante :

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = \tilde{A}(\xi) \cdot \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \cdot \left(\frac{W_{lib}(\xi)}{W_o}\right)^N \quad [\text{Eq. 7}]$$

Où $\left(\frac{W_{lib}(\xi)}{W_o}\right)$ représente le ratio entre l'eau libre et l'eau initialement contenue dans l'éprouvette. N est l'ordre apparent de la réaction, nous le prenons égal à 1,5 en première approximation (Gartner et

al., 2001). Des essais de calorimétrie, sur le même matériau en faisant varier le rapport E/C, sont en cours afin de permettre d'identifier ce paramètre.

Une fois le séchage activé, la teneur en eau dans le matériau diminue et devient moins disponible pour l'hydratation. De surcroît, la porosité importante de notre mortier (voir 2.6) accentue ce phénomène et un séchage au jeune âge peut largement perturber le processus d'hydratation. Une simulation numérique dans un cadre axisymétrique sur un quart d'éprouvette 20x40x160 mm a permis de mettre en exergue ce phénomène comme on peut le voir sur la figure 7.

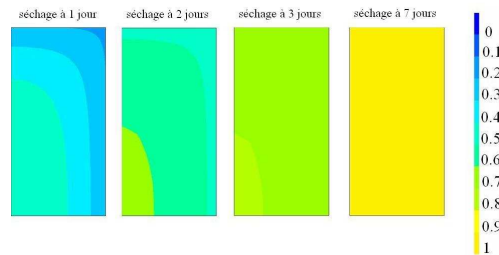


Figure 7 : Cartographies de ζ pour différentes échéances de séchage.

3.2. DIFFUSION DE L'EAU ET CINÉTIQUE DE PERTE EN MASSE

Le transfert de l'eau dans un milieu poreux comme le mortier peut se faire sous différentes formes (vapeur, liquide ou mixte). On peut prendre en compte ces différents modes de transfert de manière globale en utilisant la seconde loi de Fick. A cette équation on rajoute un terme lié à la consommation de l'eau par la réaction d'hydratation. On peut ainsi écrire :

$$\frac{\partial W_{lib}}{\partial t} = \nabla [D_{eq}(W_{lib}) \cdot \nabla W_{lib}] - \frac{\partial W_{hydra}}{\partial t} \quad [\text{Eq. 8}]$$

Où W_{hydra} représente la quantité d'eau consommée par les réactions d'hydratation (liée chimiquement et adsorbée physiquement dans la porosité des hydrates). D_{eq} (m^2/s) représente le coefficient de diffusion de l'eau au sein du matériau. Celui-ci a été calé sur nos essais en utilisant la relation donnée par (Xi *et al.*, 1994).

Les conditions aux limites soumises à l'éprouvette 20x40x160 mm simulée, sont des échanges de type convectif, le coefficient d'échange a été calculé grâce à (Torrenti *et al.*, 1997).

La figure 8 présente les résultats obtenus numériquement pour des éprouvettes séchées à diverses échéances. La simulation reproduit bien le comportement observé expérimentalement. Le séchage au jeune âge perturbe l'hydratation de manière significative. Les valeurs finales de perte en masse n'ont pas pu être déterminées avec précision pour l'instant. L'utilisation de modèle de transferts basées sur la microstructure notamment permettrait peut être de mieux identifier nos résultats.

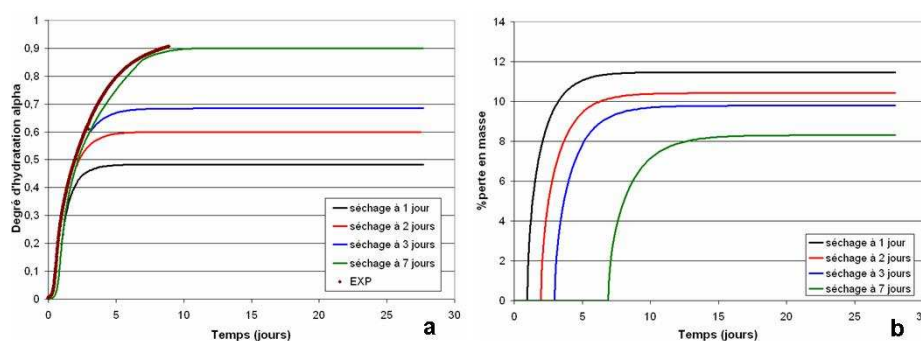


Figure 8 : a : Evolution du degré d'hydratation au centre de l'éprouvette (simulations en trait plein et points expérimentaux) en fonction du séchage, b : Simulation des cinétiques de perte en masse pour des séchages à différentes échéances.

4. CONCLUSIONS

Cette étude sur une couche mince de mortier a permis de mettre en évidence un certain nombre de phénomènes antagonistes. La caractérisation de la fissuration par des essais à l'anneau a permis de montrer qu'un séchage au jeune âge pouvait retarder voir empêcher la macro-fissuration du mortier. Ce phénomène est fréquemment rencontré dans le cas des chapes ou des dalles de faible épaisseur. Le suivi des pertes en masse, du retrait et de la porosité du matériau a rendu compte d'un couplage important entre hydratation et séchage au jeune âge pouvant expliquer la diminution de retrait du matériau. La modélisation par éléments finis a confirmé cette tendance et a montré l'impact du séchage sur l'avancement des réactions. On peut ainsi penser que les propriétés de durabilité seront affectées, dues à une porosité plus importante principalement en surface, qui sera la porte ouverte à la pénétration d'agents agressifs.

5. BIBLIOGRAPHIE

- Haouas A. (2007) « Comportement au jeune âge des matériaux cimentaires – caractérisation et modélisation Chimio-Hydro-Mécanique du retrait » Thèse de doctorat de l'ENS de Cachan, Cachan, 203 pages.
- Waller V. (1999) « Relations entre composition des bétons, exothermie en cours de prise et résistance en compression » Thèse de doctorat de l'ENPC, Paris, 297 pages.
- Hossein A. B., Weiss W. J. (2004) « Assessing residual stress development and stress relaxation in restrained concrete ring specimens » *Cement and Concrete Composites*, vol.26, p. 531-540.
- Lackner R., Pichler C., Mang H. A. (2005) « Thermochemomechanics of cement-based materials at finer scales of observation: Application to hybrid analyses of shotcrete tunnel linings », dans : « Engineering Structures under Extreme Conditions - Multi-Physics and Multi-Scale Computer Models in Non-Linear Analysis and Optimal Design », A. Ibrahimbegovic, B. Brank (Hrg.); IOS Press, 2005, ISBN: 1 58603 479 0, p. 170-199.
- Gartner E. J., Young J. F., Damidot D. A., Jawed I. (2001) « Chapter 3: Hydration of Portland cement » dans : « Structures and performance of cements », 2nd edition, ed. J. Bensted and P. Barnes.
- Xi Y., Bazant Z., Jennings H. M. (1994) « Moisture diffusion in cementitious materials: Part i & ii » *Advn. Cem. Bas. Mat.*, 1, p. 258-266.
- Torrenti J. M., Granger L., Diruy M., Genin P. (1997) « Modélisation du retrait du béton en ambiance variable », *Revue Française de Génie Civil*, 1[4], p. 687-698.