

Conclusions et perspectives

La Réaction Sulfatique Interne (RSI) est une pathologie touchant aujourd'hui de façon avérée et principale plusieurs dizaines d'ouvrages en France. Pour un gestionnaire d'ouvrage, il convient le cas échéant de savoir diagnostiquer la RSI sur un ouvrage, établir si l'intégrité structurelle de celui-ci permet de garantir les exigences de service correspondantes, mettre en œuvre des réparations et prédire l'évolution des désordres. Ainsi, il est nécessaire de comprendre finement les effets mécaniques de la réaction à l'échelle du matériau et de la structure d'une part, et d'autre part de disposer d'outils de re-calcul des ouvrages atteints permettant d'évaluer leur intégrité structurelle à tout instant. Certains de ces outils ont été développés durant ces dernières années. Néanmoins, le caractère relativement récent de cette pathologie découverte à la fin des années 80 a parfois conduit à des manques de données disponibles dans la littérature permettant d'étayer certaines hypothèses formulées dans le cadre de la méthodologie de modélisation. Dans ce contexte, les travaux de thèse présentés dans ce mémoire ambitionnaient de développer les connaissances déjà acquises en ce qui concerne les mécanismes réactionnels à l'échelle du matériau, d'évaluer les effets mécaniques de cette pathologie à l'échelle de la structure et enfin de constituer une base de données utile à la compréhension du fonctionnement des ouvrages atteints et permettant une validation quantifiée des outils de re-calcul.

L'étude bibliographique a mis en évidence la complexité des mécanismes sous-jacents à la RSI. Si les études documentées dans la littérature apportent une large contribution à la compréhension des phénomènes chimiques pathogènes, les multiples paramètres influençant cette réaction et les nombreux couplages pouvant exister entre eux (chimiques, mécaniques, thermiques, hydriques) rendent encore délicate l'utilisation directe des résultats (souvent obtenus sur mortiers) pour la mise au point de méthodes de re-calcul des ouvrages atteints. Néanmoins, ces connaissances constituent une contribution irremplaçable pour la compréhension des phénomènes physico-chimiques, la détermination des conditions d'occurrence de la réaction ou bien encore pour la formulation de mécanismes de gonflement des matériaux atteints. Sur la base de ces éléments et des investigations *in situ* menées par le passé, un programme expérimental a été mis au point et réalisé afin de compléter les connaissances déjà acquises et pour proposer des résultats permettant de quantifier les effets de la RSI à l'échelle du matériau et de la structure.

Le programme expérimental mis en œuvre dans ces travaux peut être divisé en deux parties. La première consiste en la réalisation d'essais sur des éprouvettes de béton dont les volumes sont déterminés pour être considérés comme représentatifs des matériaux étudiés et assurer des conditions de sollicitation homogènes (à l'exception des corps d'épreuve soumis au séchage). Les résultats correspondants sont alors considérés comme des données intrinsèques aux matériaux. La seconde partie correspond à la réalisation d'essais sur structures. Dans ce cadre, les objectifs visés sont d'une part de comprendre les effets mécaniques de la RSI sur des corps d'épreuve de compositions (matériau et renforcement par armatures) diverses et d'autre part de constituer une base de données originale pouvant être utilisée pour la validation de méthodes de re-calcul d'ouvrages atteints en comparant les prédictions des outils numériques aux suivis expérimentaux issus de ces travaux.

Afin de provoquer la RSI, l'application d'un échauffement se révèle nécessaire. Une des difficultés a consisté en la création d'une histoire thermique similaire dans tous les

corps d'épreuve, quelle que soit leur géométrie (poutre ou éprouvette) ou leur composition (différentes formules de béton). Afin de s'affranchir des différents mécanismes thermiques inhérents à ces diverses configurations expérimentales, le traitement thermique a été dimensionné pour recréer des conditions quasi-adiabatiques durant la phase de chauffe (par le biais d'un pseudo-asservissement de la température de cure sur l'évolution de température du matériau en conditions adiabatiques), limitant ainsi les échanges thermiques et donc les hétérogénéités du champ de température. De cette manière, on impose un potentiel de gonflement de RSI d'origine thermique similaire pour tous les corps d'épreuve, ce qui est une nécessité pour permettre par la suite la comparaison des résultats expérimentaux issus des différentes expérimentations. Par l'application d'un traitement thermique et le choix approprié des matériaux, des phénomènes expansifs aboutissant à des déformations de l'ordre de 1,5 % ont pu être recréés.

Durant la phase de suivi des corps d'épreuve, l'expérimentation mise en œuvre dans cette thèse a bénéficié du retour d'expérience des travaux de S. Multon (*Multon 2004*). Néanmoins, à cause des conditions d'exposition très sévères durant la cure thermique et des amplitudes de gonflement considérablement plus importantes dans le cas de la RSI que dans celui de la RAG, de nombreuses adaptations/innovations ont dû être apportées et sont décrites dans ce mémoire.

Une large partie de ces travaux est consacrée à l'étude des couplages existant entre conditions d'exposition à l'humidité et expansions de RSI et/ou de RAG. Conformément aux résultats de la littérature, une augmentation des effets délétères avec l'augmentation de l'humidité environnante a été vérifiée. Pour des états de saturation du matériau contrôlés, ces effets ont été quantifiés en termes de cinétique et d'amplitude par le biais du modèle développé par (*Brunetaud 2005*) et basé sur les travaux de (*Larive 1998*). Ainsi, des gonflements plus importants sont observés pour des corps d'épreuve conservés en eau que pour d'autres conservés à 100 % HR. Néanmoins, outre les différences en termes d'humidité, une lixiviation des alcalins plus importante dans le cas d'une immersion a été mise en évidence et peut également avoir des effets favorables vis-à-vis de la RSI en favorisant la désorption des sulfates contenus dans les CSH, encourageant ainsi la précipitation d'ettringite.

La fabrication d'un béton à l'aide d'un ciment PM ES a confirmé la nécessité de prendre systématiquement en compte un couple béton / échauffement pour caractériser un risque de RSI. En effet, ce type de ciment réputé peu enclin à développer des expansions de RSI a néanmoins conduit à la mesure de gonflements de l'ordre de 0,3 %. Cependant, le comportement expansif s'est révélé assez nettement différent de celui de formules plus expansives.

Par ailleurs, les corps d'épreuve conservés sous scellement hydrique n'ont fait état d'aucun gonflement après environ 530 jours de suivi. La question de l'impossibilité de gonflement de RSI en l'absence d'un apport d'eau externe est donc posée. A la lumière de nos résultats, il nous semble plausible que cette absence de gonflement soit le fruit d'un effet de cinétique plutôt que d'une impossibilité chimique de développer des gonflements : l'évaluation des profils de séchage dans les corps d'épreuve correspondants indique que l'humidité est maintenue à un niveau élevé au cœur des éprouvettes, et ce même à la fin de la période de suivi. Ainsi, des conditions favorables au développement de RSI pourraient être maintenues durant une longue période. Par ailleurs, une humidification tardive de ces corps d'épreuve révèle des amplitudes et des temps caractéristiques de gonflement tout à fait comparables aux cas d'une humidification appliquée directement 28 jours après coulage. En revanche, le temps de latence observé dans le cas d'une humidification tardive est beaucoup plus court : ceci semble indiquer qu'une partie de ce temps de latence a été

consommée durant la première phase de conservation sous scellement hydrique et que par conséquent, la pathologie a été initiée à ce stade, même si aucun effet macroscopique n'a pu être décelé par les méthodes expérimentales que nous avons mises en œuvre. Afin d'étayer cette hypothèse, des suivis dimensionnels à long terme sur corps d'épreuve scellés ont été mis en place.

D'autre part, le séchage des éprouvettes dans une atmosphère à 30 % HR a conduit à l'absence de gonflement et même à un retrait. L'évaluation des profils de séchage dans ces conditions a montré que le cœur des corps d'épreuve est rapidement atteint par le front de séchage dans ces conditions. En outre, une humidification tardive de ces mêmes éprouvettes a conduit à des expansions d'amplitude et de temps caractéristique comparables au cas d'une humidification précoce appliquée 28 jours après coulage. En revanche, le temps de latence est considérablement plus important dans le cas d'une humidification tardive : on en déduit que la RSI ne semble pas être déclenchée en dessous d'un certain seuil d'humidité interne. Par l'application de différentes histoires hydriques, l'existence d'un seuil de degré de saturation en dessous duquel aucun gonflement n'est observé a été mis en évidence et semble être de l'ordre de 0,95.

Enfin, une analyse des modifications de comportement hydrique sous les effets des gonflements a été menée. En ce qui concerne le retrait de dessiccation, le développement d'expansions préalables conduit à une modification du comportement du matériau vis-à-vis du séchage dans le cas de réactions fortement délétères. Ceci peut s'expliquer par la fissuration importante développée dans ce cas. En revanche, pour une réaction beaucoup moins agressive, cette modification de comportement vis-à-vis de la dessiccation est beaucoup moins marquée. Cette conclusion est en accord avec les travaux de (*Multon 2004*) sur la RAG pour des amplitudes d'expansion comparables. Par ailleurs, une analyse comparative des évolutions dimensionnelles en fonction des évolutions massiques semble indiquer que les prises de masse importantes mesurées lors du développement intense d'expansions induites par la RSI sont probablement essentiellement le fruit d'une mobilisation d'eau dans les vides créés lors de l'expansion du matériau. Même si une part de cette prise de masse est nécessairement issue de la mobilisation d'eau pour la formation des produits de réaction, ce dernier phénomène ne semble avoir qu'une contribution mineure durant cette phase de gonflement intense.

L'ensemble de ces investigations présente des implications en ce qui concerne la formulation de modèles de re-calcul des ouvrages atteints. La forte dépendance à l'humidité de la RSI est confirmée. Néanmoins, il semble que le seuil de déclenchement de la réaction soit nettement plus élevé que celui de la RAG et nécessite donc un calibrage plus fin des lois de couplage. Par ailleurs, la modification des propriétés de transfert des matériaux s'est révélée significative, que ce soit en régime d'imbibition ou de séchage. La prise en compte de ces modifications nécessiterait un couplage entre calcul mécanique et calcul hydrique dans les méthodes de re-calcul ainsi que l'établissement de lois de couplage entre les expansions et l'évolution des propriétés de transfert.

L'étude d'un matériau susceptible de RSI et de RAG a révélé un comportement expansif spécifique. Contrairement au cas d'un matériau uniquement susceptible de RSI, les suivis dimensionnels ont mis en évidence une amplitude d'expansion supérieure dans le cas de corps d'épreuve conservés à 100 % HR par rapport à ceux conservés en eau. Afin d'expliquer ce phénomène, un mécanisme de gonflement a été proposé et la modélisation mathématique associée a été formulée. Ce mécanisme suggère que la lixiviation des alcalins, plus lente dans le cas d'un matériau conservé à 100 % HR, permet de disposer d'un potentiel de formation de gel de RAG suffisamment conséquent à l'issue de la RSI pour permettre une poursuite des gonflements non observée dans le cas d'un matériau

immergé trop appauvri en alcalins. Des essais ont été effectués pour confirmer ces hypothèses et les premiers résultats correspondants semblent les appuyer. Néanmoins, une campagne d'essai plus poussée permettrait d'affiner nos connaissances sur ce point.

Par ailleurs, si les essais réalisés au cours de ce programme semblent appuyer le mécanisme que nous avons formulé, en l'absence d'investigations complémentaires, il ne peut être appliqué directement qu'à nos conditions expérimentales spécifiques (conditions de cure thermique, de conservation hydrique, composition du matériau...). En effet, les couplages potentiels existant entre ces deux réactions sont tels qu'il n'est pas possible d'étendre aisément le domaine de validité de ce mécanisme formulé pour l'instant de façon purement additive. Ainsi, on peut citer par exemple le couplage thermique entre la RSI et la RAG durant la cure thermique (l'application d'un échauffement plus ou moins intense influera sur la thermoactivation de la RAG mais jouera également sur le potentiel de RSI) ou bien encore l'influence de la température de stockage des corps d'épreuve pouvant influencer sur la compétition entre ces deux réactions pathogènes. En tout état de cause, il apparaît nécessaire de considérer à minima la RSI et la RAG comme deux réactions d'avancement séparé, toutes deux influencées par la saturation, la température et la teneur en alcalins, mettant ainsi en évidence les couplages entre ces deux phénomènes.

Les essais sur poutres ont eu pour objectif de comprendre et quantifier les effets mécaniques de la RSI sur des structures simples en conditions contrôlées. Par l'application d'un gradient hydrique sévère (humidification en partie inférieure et séchage à 30 % HR en partie supérieure), la création d'un gradient de gonflement était souhaitée, à l'instar des travaux de (*Multon 2004*) sur les effets de la RAG sur les structures.

Cette technique expérimentale s'est révélée pertinente pour le cas de la RSI. Une fois de plus, les effets de la RSI pouvant être beaucoup plus marqués que ceux de la RAG, les effets structurels observés ont été démultipliés par rapport à l'étude de (*Multon 2004*). Le cas des poutres non armées a mis en évidence une mise en flexion des structures aboutissant à une rupture spontanée sous poids propre pour les poutres P2 (fortement réactive vis-à-vis de la RSI) et P5 (fortement réactive vis-à-vis de la RSI et de la RAG) respectivement en 330 jours et en 170 jours. Dans le cas des poutres armées, l'effet de « précontrainte chimique » (correspondant à une compression en partie inférieure par la sollicitation des armatures soumises à un gonflement imposé) mis en évidence par (*Multon 2004*) pour le cas de la RAG est également observé pour la RSI seule ou couplée à la RAG. Cet effet induit par la présence d'armatures longitudinales conduit à une inversion de la courbure des structures, la fibre supérieure se retrouvant tendue et développant une fissuration transversale importante.

La confrontation des différentes mesures locales et globales a permis de montrer que les hypothèses de la théorie des poutres restent vérifiées, que les poutres soient armées ou non. En particulier, il est généralement possible de retrouver de manière satisfaisante la flèche mesurée sur les structures en estimant la courbure des sections grâce aux mesures de déformations locales par jauges noyées. On gardera toutefois à l'esprit que les écarts entre estimation et mesure peuvent se révéler significatifs, les mesures étant rendues délicates par les déformations importantes appliquées aux structures et la fissuration parfois importante. Toutefois, il a été démontré que le fonctionnement structurel de ces corps d'épreuve dans la direction longitudinale peut entièrement être décrit par la donnée d'un profil de déformation horizontale que l'on se propose de caractériser dans ces travaux par une courbure et une déformation longitudinale moyenne. Pour chaque corps d'épreuve, un tel profil a été identifié en fonction du temps.

La présence d'armatures longitudinales a provoqué un comportement caractéristique des structures : dans un premier temps, on note une déflexion vers le bas

des corps d'épreuve sous l'effet des gonflements en partie inférieure analogue à celui des poutres non armées. Lors du développement des expansions, les aciers longitudinaux sont soumis à une sollicitation de traction. Par réaction, ils appliquent alors un effort interne de compression en partie basse de la poutre (également dénommé « précontrainte chimique »). L'effort normal décentré correspondant conduit à une inversion du sens de variation des flèches aboutissant à une déflexion des structures vers le haut à la fin de la phase de séchage.

Afin de mieux comprendre le fonctionnement des structures atteintes de RSI, une première analyse des résultats a été proposée sur la base de calculs réalisés dans le cadre de la théorie de la résistance des matériaux. Le principe de cette analyse consiste en l'estimation de la réponse d'une structure à partir d'un profil de déformations chimiques imposées. Ce profil est identifié à l'aide du profil hydrique des structures. A l'instar des travaux de (*Multon 2004*), l'utilisation combinée des teneurs en eau globale obtenues par pesée et des teneurs en eau locale dans la partie soumise à un séchage par gammadensimétrie permet d'estimer les profondeurs de séchage et d'imbibition au cours du temps. Néanmoins, les expansions intenses dues à la RSI ont montré qu'une cinétique d'imbibition proportionnelle à la racine carrée du temps ne semble pas adaptée pour décrire les prises de masses très importantes observées dans le cas de cette étude. Deux hypothèses différentes ont alors été formulées : la première suggère que la cinétique d'imbibition se fait selon une loi sigmoïde identique à celle permettant de retranscrire l'imbibition globale des poutres avec un matériau passant instantanément de son état initial à son état saturé ; la seconde considère une cinétique d'imbibition en racine carrée du temps avec une prise de masse du matériau dont la cinétique est calquée sur celle de l'imbibition du corps d'épreuve. Ces deux hypothèses sont très fortes mais indispensables pour estimer de façon simple le profil hydrique dans les structures à la lumière des données dont nous disposons. Nos premières analyses semblent montrer que la première approche est probablement plus réaliste.

Sur la base des profils hydriques calculés, on identifie un profil de déformations imposées dont les valeurs sont issues des essais sur éprouvettes du programme expérimental. Différentes hypothèses ont été testées. Malgré les nombreuses hypothèses simplificatrices qu'il nous a été nécessaire de formuler, le comportement global des structures peut être retrouvé de façon satisfaisante la plupart du temps, sous réserve de tenir compte à minima, et notamment pour les poutres armées, de la chute de module d'Young associée aux fortes expansions et du couplage conduisant à la réduction des déformations chimiques imposées dans les directions les plus comprimées. Cette première analyse permet ainsi de tester la pertinence de certains jeux d'hypothèses par rapport aux effets mécaniques de la RSI sur des structures. Ces résultats constituent ainsi un test quantitatif important pour la compréhension du fonctionnement des structures atteintes.

Pour progresser dans la qualification de méthodes de re-calcul, un exemple d'application du module RGIB développé par (*Baghdadi 2008*) a été mis en œuvre. Il met en évidence plusieurs difficultés. Avant la réalisation de tout calcul mécanique, des difficultés de retranscription des phénomènes de transfert hydrique ont été notées. En particulier, la reproduction d'un gain de masse inhérent au développement d'expansions n'a pu être mise en évidence. Ceci a confirmé nos premières conclusions issues des analyses des effets de la RSI à l'échelle du matériau et mettant en évidence la modification du comportement hydrique de celui-ci sous l'effet des fortes expansions. La prise en compte de ce couplage expansion – propriétés de transfert apparaît indispensable pour retranscrire l'imbibition de manière satisfaisante. Ainsi, un couplage du calcul mécanique

et du calcul hydrique devrait être programmé pour améliorer cet écart entre modèle et expérience.

Par ailleurs, pour des calculs hydriques jugés représentatifs de la réalité, un biais entre calcul mécanique et mesure a été mis en évidence. Il semble que l'utilisation de l'amplitude et de la cinétique d'expansion en gonflement libre immergé conduise à ce résultat. Il est suggéré que la différence de lixiviation des alcalins entre ces petits corps d'épreuve et les poutres conduise à des différences de cinétique. Si cette conclusion est avérée, un couplage entre le calcul de déformation imposée et la teneur en alcalins (impliquant un calcul de diffusion de ces espèces au cours du temps, calcul potentiellement couplé à l'état de dégradation du matériau) se révélerait nécessaire.

Au total, ces travaux fournissent, pour une famille de matériaux, une quantification détaillée des expansions de RSI dans différents états de saturation et contribuent ainsi à la compréhension de l'influence de l'humidité sur le développement de cette pathologie. Une analyse détaillée des prises de masse en fonction des gonflements indique que les forts gains de masse mesurés sont principalement le fruit d'un remplissage des fissures nouvellement créées par l'eau. Ceci correspond également à une nette modification des propriétés de transfert. Dans le cadre des méthodes de re-calcul, la prise en compte de ce couplage nécessite un développement algorithmique.

Par ailleurs, l'étude d'un cas de concomitance entre RSI et RAG a confirmé les couplages physico-chimiques entre ces deux pathologies aux effets macroscopiques voisins. En particulier, l'effet de la température (que ce soit l'échauffement nécessaire au développement de RSI ou la température d'exposition à long terme) et la lixiviation des alcalins favorisant la RSI au détriment de la RAG se révèlent être deux points particulièrement critiques pour le développement d'une réaction préférentiellement à une autre. A la suite de notre travail, il conviendrait de réfléchir à la façon la plus opportune de tenir compte de ces aspects pour recalculer les structures atteintes.

Enfin, une base de données a été constituée à partir de l'étude expérimentale de poutres atteintes de réactions de gonflement interne. Les comportements mécanique et hydrique de ces corps d'épreuve ont été caractérisés le plus finement possible. Le fonctionnement structurel a été analysé en détail. En particulier, la validité de la théorie des poutres a été établie. Le fonctionnement longitudinal des poutres peut ainsi être décrit par la donnée d'un profil de déformation horizontale. La base de données et son analyse est proposée dans le présent manuscrit et sera complétée d'ici un an (notamment par les données liées à la phase de remouillage et par la résistance résiduelle des poutres). Les essais de modélisation effectués dans ce mémoire montrent que des perspectives d'amélioration des outils de calcul restent largement ouvertes.

Le programme expérimental prévoyait initialement la caractérisation des performances mécaniques lors du développement de gonflements d'une part, et la quantification des couplages entre état de contraintes et expansions d'autre part. Ces deux séries d'essais ont été mises au point sur des corps d'épreuve scellés. Contrairement à ce que nous escomptions, la quasi-absence de gonflements dans ces deux cas ne nous a pas permis d'aboutir à des quantifications utilisables pour décrire les matériaux atteints. Néanmoins, cette absence de données constitue un retour d'expérience utile à la mise au point future d'essais similaires qui restent nécessaires pour la formulation de lois de couplages traduisant l'effet des champs de contraintes, et la dégradation des performances

mécaniques dans les parties d'ouvrages saturées où se développent les expansions induites par la RSI.

Les essais menés sur le matériau susceptible de RSI et de RAG ont révélé et quantifié dans quelques situations particulières une partie des nombreux couplages pouvant exister entre ces deux pathologies. Les résultats présentés dans ce rapport constituent ainsi une première étape à la compréhension et à la quantification de ces phénomènes. Néanmoins, des investigations complémentaires nous sembleraient devoir être menées sur ce couplage afin d'éclaircir les effets du traitement thermique, de la température de stockage, de la teneur en alcalins (et de la lixiviation correspondante), des potentiels initiaux de RSI et de RAG (en effet, l'importance de la dégradation apportée par une réaction peut favoriser l'autre ou au contraire la réduire)... Cette thématique présente un enjeu d'autant plus important qu'une très grande partie des cas d'expertise font état de cette concomitance des deux réactions.

Les essais que nous avons menés sur éprouvettes immergées et en conditions saturées ont permis de compléter la caractérisation des couplages entre humidité et gonflement. Néanmoins, une base de données plus précise serait indispensable pour formuler et calibrer une loi de couplage humidité-gonflement telle que celle proposée par (Poyet 2003) dans le cas de la RAG et réutilisée par (Baghdadi 2008) pour sa modélisation de la RSI. Il faut cependant cibler le domaine d'étude autour de l'éventuel seuil de déclenchement de la réaction, en veillant aux difficultés métrologiques et d'interprétation correspondant au domaine où l'eau liquide constitue une phase connectée ou presque dans la porosité du béton.

Les essais sur structures ont révélé des difficultés importantes quant à la réalisation d'un suivi prolongé de tels corps d'épreuve. En particulier, le suivi hydrique local des poutres s'est révélé délicat. Les déformations et les fissurations très importantes des poutres ont parfois rendu très complexe le suivi dimensionnel des structures. Ainsi, il pourrait se révéler intéressant de mener un programme complémentaire sur des structures plus « rudimentaires » (et donc plus faciles à maîtriser) afin de compléter les données issues de ce programme.

D'autre part, les difficultés rencontrées pour l'estimation des profils hydriques des poutres ont montré une profonde modification du comportement hydrique des matériaux atteints de RSI. Il nous semblerait donc intéressant de disposer de données supplémentaires permettant d'estimer l'évolution des caractéristiques de transfert hydrique des matériaux atteints de RSI et ce afin d'intégrer ces phénomènes aux outils de re-calcul. En effet, les couplages entre gonflement et humidité sont tels qu'il apparaît délicat de ne pas prendre en compte la modification des échanges hydriques dans les matériaux atteints de ces réactions pathogènes. Une question similaire et partiellement connexe se pose également pour la lixiviation des alcalins.

L'ensemble des données acquises dans cette recherche a pour finalité de caractériser la pertinence des hypothèses formulées dans les différentes méthodes de re-calcul. Ainsi, la base de données sur structures doit être confrontée aux prédictions de ces outils numériques dont l'utilisation et l'interprétation des résultats est facilitée par les conditions d'exposition contrôlées qu'il nous a été possible de recréer en laboratoire. De telles études doivent permettre de valider les outils définis et/ou de les faire évoluer afin de mieux retranscrire la réalité, dans un souci de fournir aux gestionnaires d'ouvrages des outils utiles au traitement des ouvrages atteints de réaction(s) de gonflement interne.

Enfin, l'ensemble de ces données est issu d'essais en laboratoire, milieu « aseptisé » où l'essentiel des paramètres est contrôlé. Néanmoins, il convient de se poser la question de la pertinence de ces essais et des résultats correspondants par rapport à des matériaux *in situ*. Afin de répondre à cette interrogation, la réalisation d'essais à très long terme en vieillissement naturel en complément d'études et de modélisations des phénomènes à l'échelle mésoscopique pourrait être envisagée. Si de telles expérimentations sont très délicates à mettre en œuvre, il ne nous semble pas possible d'en faire l'économie pour progresser dans la maîtrise du vieillissement effectif des ouvrages atteints. L'objectif final étant de modéliser le comportement d'ouvrages réels, il semble nécessaire de confronter nos prédictions à cette réalité dans des cas bien documentés.

Plusieurs des perspectives ici décrites se trouvent abordées dans la nouvelle opération de recherche 11R104 « Risques de réactions de gonflement interne dans les bétons de structure d'ouvrages stratégiques » engagée depuis début 2010 par le LCPC, où la finalisation et la valorisation des présents travaux doivent trouver toute leur place.

Références

A

- Acker P. 1988, Comportement mécanique du béton : apports de l'approche physico-chimique, *Rapport de recherche LPC n°152*, 121 p.
- AFNOR, 1981-a, Bétons – Mise en place par microtable vibrante, NF P 18-421, 8p.
- AFNOR, 1981-b, Bétons – Mise en place par aiguille vibrante, NF P 18-422, 14 p.
- AFNOR, 2004, Méthode d'essai des ciments – Partie 9 : chaleur d'hydratation – Méthode semi-adiabatique, NF EN 196-9, 22 p.
- Albert B., Guy B., Damidot D., 2006, Water chemical potential: a key parameter to determine the thermodynamic stability of some hydrated cement phases in concrete?, *Cement and Concrete Research*, 36, 783-790
- Andrade C., Sarria J., Alonso C., 1999, Relative humidity in the interior of concrete exposed to natural and artificial weathering, *Cement and Concrete Research*, 29, 1249-1259
- ASTM, 2005, C1260-05 Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method), *American Society for Testing and Materials*, Volume 04.02, 5p.
- ASTM, 2008, C1293 Test method for determination of length change of concrete due to Alkali-Silica Reaction, *American Society for Testing and Materials*, Volume 04.02, 5p.
- Atkins M., Macphee D., Kindness A., Glasser F.P., 1991, Solubility properties of ternary and quaternary compounds in the CaO-Al₂O₃-SO₃-H₂O system, *Cement and Concrete Research*, 21, 991-998
- Aubagnac C. & Wendling J.-C., 2007, Présentation du pont de Gevry sur le Doubs – RD 905, *La réaction sulfatique interne dans les bétons – Prévention des risques et gestion des ouvrages malades*, Journée technique du LCPC, 02/10/2007, 25 p.
- Aubert J.-E., Escadeillas G., Leklou N., 2009, Expansion of five-year-old mortars attributable to DEF: relevance of the laboratory studies on DEF, *Construction and Building Materials*, 23(12), 3583-3585

B

- Bae S., Bayrak O., Jirsa J.O., Klingner R.E., 2009, Effect of Alkali-Silica Reaction / Delayed Ettringite formation damage on behavior of deeply embedded anchor bolts, *ACI Structural Journal*, 106(6), 848-857
- Baghdadi N., Toutlemonde F., Seignol J.-F., 2007-a, Modélisation de l'effet des contraintes sur l'anisotropie de l'expansion dans les bétons atteints de réaction de gonflement interne, *25^{ème} rencontres de l'AUGC*, Bordeaux.
- Baghdadi N., Seignol J.-F., Toutlemonde F., 2007-b, Modélisation du couplage chimico-mécanique pour calculer une structure en béton atteinte de réaction sulfatique interne, *18^{ème} congrès français de mécanique*, Bordeaux, France.

- Baghdadi N., 2008, Modélisation du couplage chimico-mécanique d'un béton atteint d'une réaction sulfatique interne, thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 229 p.
- Baghdadi N., Seignol J.-F., Toutlemonde F., 2008-a, Chemo-mechanical model describing the expansion due to internal sulfate attack: numerical simulation, *International RILEM symposium CONMOD'08*, Delft, The Netherlands.
- Baghdadi, N., Seignol, J.-F., Martin, R.-P., Renaud, J.-C., Toutlemonde, F., 2008-b, Effect of early age thermal history on the expansion due to delayed ettringite formation: experimental study and model calibration, *Euro Mediterranean symposium on Advances in Geomaterials AGS'08*, Hammamet, Tunisia, 661-666
- Barbarulo R., 2002, Comportement des matériaux cimentaires : action des sulfates et de la température, thèse de Doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, Cachan, 272 p.
- Barbarulo R., Peycelon H., Prené S., 2002, The role of CSH and temperature in delayed ettringite formation, *International RILEM TC 186-ISA workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation*, Villars, Switzerland, 155-166
- Barbarulo R., Peycelon H., Prené S., Marchand J., 2005, DEF symptoms on mortars induced by high temperature due to cement heat of hydration or late thermal cycle, *Cement and Concrete Research*, 35, 125-131
- Barbarulo R., Peycelon H., Leclercq S., 2007, Chemical equilibria between CSH and ettringite at 20°C and 85°C, *Cement and Concrete Research*, 37, 1176-1181
- Baroghel-Bouny V., 1994, Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons – Méthodes, analyses, interprétations, *Presse du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*, 468 p.
- Bary B., 2010, Contribution à l'étude de phénomènes multi-physiques dans les matériaux cimentaires, mémoire d'Habilitation à Diriger les Recherches, Ecole Normale Supérieure de Cachan, Cachan, 91 p.
- Batic O., Milanesi C.A., Maiza P.J., Marfil S.A., 2000, Secondary ettringite formation in concrete subjected to different curing conditions, *Cement and Concrete Research*, 30, 1407-1412
- Bentz D.P., Quenard D.A., Baroghel-Bouny V., Garboczi E.J., Jennings H.M., 1995, Modelling drying shrinkage of cement paste and mortar. Part 1: Structural models from nanometres to millimetres, *Materials and Structures*, 28, 450-458
- Boenig A., Fúnez L.M., Memberg L., Roche J., Tinkey B., Klingner R.E., Fowler T.J., 2009, Structural assessment of bridges with premature concrete deterioration due to expansive reactions, *ACI Structural Journal*, 106(2), 196-204
- Bournazel J.-P., Moranville Regourd M., Sellier A., 1996, Microstructure of steam cured concretes deteriorated by alkali silica reaction, *10th International Conference on Alkali Aggregate Reaction ICAAR*, Melbourne, Australia, 949-956
- British Standards Institute (BSI), 1999, BS 812-123 Testing aggregates: method for determination of alkali-silica reactivity – concrete prism method, *British Standards Institute*, 18 p.

- Broekmans M.A.T.M., 2009, Petrography as an essential complementary method in forensic assessment of concrete deterioration: two case studies, *Materials Characterization*, 60, 644-654
- Broquet J.-F., 2007, Réparation du chevêtre de Fozières, *La réaction sulfatique interne dans les bétons – Prévention des risques et gestion des ouvrages malades*, Journée technique du LCPC, 02/10/2007, 24 p.
- Brown P.W., Bothe J.V., 1993, The stability of ettringite, *Advances in Cement Research*, 5(18), 47-63
- Brunetaud X., 2005, Etude de l'influence de différents paramètres et de leurs interactions sur la cinétique et l'amplitude de la réaction sulfatique interne au béton, thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Paris, 265 p.
- Brunetaud X., Divet L., Damidot D., 2005, Delayed ettringite formation: suggestion of a global mechanism in order to link previous hypotheses, *ACI SP 222-5 7th CANMET Recent Advances in Cement Research*, Las Vegas, USA, 63-76
- Brunetaud X., Linder R., Divet L., Duragrín D., Damidot D., 2007, Effect of curing conditions and concrete mix design on the expansion generated by DEF, *Materials and Structures*, 40, 567-578.
- Brunetaud X., Divet L., Damidot D., 2008, Impact of unrestrained delayed ettringite formation-induced expansion on concrete mechanical properties, *Cement and Concrete Research*, 38(11), 1343-1348
- Burgher B., Thibonnier A., Folliard K.J., Ley T., Thomas M.D.A., 2008, Investigation of the internal stresses caused by delayed ettringite formation in concrete, Texas Department Of Transportation TxDOT, 97 p.
- Sous la direction de Buyle-Bodin F. & Cussigh F., 2003, Résistance du béton dans l'ouvrage – la maturométrie, *Guide technique des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 66 p.

C

- Capra B. & Sellier A., 2003, Orthotropic modelling of alkali-aggregate reaction in concrete structures: numerical simulations, *Mechanics of Materials*, 35, 817-830
- Chen W. & Brouwers H.J.H., 2010, Alkali binding in hydrated Portland cement paste, *Cement and Concrete Research*, 40, 716-722
- Collepari M., 1999, Damage by delayed ettringite formation, *ACI Concrete International*, 21(1), 69-74
- Collepari M. & Ogoumagh Olagot J.J., 2002, The influence of sulfate content in clinker or cement and curing temperature on DEF-related expansion of concrete, *International RILEM TC 186-ISA workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation*, Villars, Switzerland, 212-228
- Collepari M., 2003, A state of the art review on delayed ettringite attack on concrete, *Cement and Concrete Composites*, 25, 401-407
- Cohen M.D., 1983, Theories of expansion in sulfoaluminate - type expansive cements: schools of thought, *Cement and Concrete Research*, 13, 809-818

- Comi C., Fedele R., Perego U., 2009, A chemo-thermo-damage model for the analysis of concrete dams affected by alkali-silica reaction, *Mechanics of Materials*, 41, 210-230
- Correns C.W., 1949, Growth and dissolution of crystals under linear pressure, *Discussion of the Faraday Society*, 5, 267-271
- CSA, 2009-a, A23.2-27A pratique normalisée de détermination du degré de réactivité alcaline des granulats et des mesures pour éviter l'expansion nuisible du béton, *Association Canadienne de Normalisation*, A23.1-09/A23.2-09 – Béton : constituants et exécution des travaux / Méthodes d'essai et pratiques normalisées pour le béton, Mississauga, Ontario, 387-400
- CSA, 2009-b, A23.2-28A pratique normalisée d'essai en laboratoire pour démontrer l'efficacité des ajouts cimentaires et des adjuvants à base de lithium à empêcher une réaction alcalis-silice dans le béton, *Association Canadienne de Normalisation*, A23.1-09/A23.2-09 – Béton : constituants et exécution des travaux / Méthodes d'essai et pratiques normalisées pour le béton, Mississauga, Ontario, 401-406

D

- Damidot D. & Glasser F.P., 1992, Thermodynamic investigation of the CaO-Al₂O₃-CaSO₄-H₂O system at 50°C and 85°C, *Cement and Concrete Research*, 22, 1179-1191
- Damidot D. & Glasser F.P., 1993, Thermodynamic investigation of the CaO-Al₂O₃-CaSO₄-H₂O system at 25°C and the influence of Na₂O, *Cement and Concrete Research*, 23, 221-238
- Damidot D., Stronach S., Kindness A., Atkins A., Glasser F.P., 1994, Thermodynamic investigation of the CaO-Al₂O₃-CaCO₃-H₂O closed system at 25°C and the influence of Na₂O, *Cement and Concrete Research*, 24(3), 563-572
- Damidot D. & Glasser F.P., 1995, Investigation of the CaO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O system at 25°C by thermodynamic calculations, *Cement and Concrete Research*, 25, 22-28
- Damidot D., Stronach S., Kindness A., Atkins A., Glasser F.P., 1995, Thermodynamic investigation of the CaO-Al₂O₃-CaSO₄-CaCO₃-H₂O closed system at 25°C and the influence of Na₂O, *Advances in Cement Research*, 7(27), 129-134
- Damidot D., Barnett S.J., Glasser F.P., Macphee E., 2004, Investigation of the CaO-Al₂O₃-SiO₂-CaSO₄-CaCO₃-H₂O system at 25°C by thermodynamic calculation, *Advances in cement research*, 2(16), 69-76
- Deng M. & Tang M., 1994, Formation and expansion of ettringite crystals, *Cement and Concrete Research*, 24, 119-126
- Deschenes D.J., Bayrak O., Folliard K.J., 2009, ASR/DEF-damaged bent caps: shear tests and field implications, Texas Department Of Transportation TxDOT, 258 p.
- Diamond S. & Ong S., 1994, Combined effects of alkali silica reaction and secondary ettringite deposition in steam cured mortars, *Ceramic Transactions*, 40, 79-90
- Diamond S., 1996, Delayed Ettringite Formation – Processes and Problems, *Cement and Concrete Composites*, 18, 205-215

- Diamond S., 2000, The relevance of laboratory studies on delayed ettringite formation to DEF in field concretes, *Cement and Concrete Research*, 30, 1987-1991
- Diamond S., 2002, Delayed ettringite formation - a current assessment, *International RILEM TC 186-ISA workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation*, Villars, Switzerland, 178-194
- Divet L., 1998, Existe-t-il un risque de développement d'une activité sulfatique endogène dans les pièces de béton de grande masse ? La cas du pont d'Ondes (Haute-Garonne), *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 213, 59-72
- Divet L. & Randriambololona R., 1998, Delayed ettringite formation: the effect of temperature and basicity on the interaction of sulphate and C-S-H Phase, *Cement and Concrete Research*, 28(3), 357-363
- Divet L., 2001, Les réactions sulfatiques internes au béton : contribution à l'étude des mécanismes de la formation différée de l'ettringite, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, *ERLPC*, OA 40, 227 p.
- Divet L., 2002, Comment se prémunir des réactions sulfatiques dans les bétons ?, *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 240, 87-94
- Divet L. & Pavoine A., 2002, Delayed ettringite formation in massive concrete structures: an account of some studies of degraded bridges, *International RILEM TC 186-ISA workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation*, Villars, Switzerland, 98-126
- Divet L., 2003, La formation différée de l'ettringite dans les bétons de parties d'ouvrages massives – Synthèse des études de ponts dégradés, *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 244-245, 91-111
- Dreux G., 1982, Composition des bétons, *Techniques de l'ingénieur*, C2 220, 1-14
- Dunant C. & Scrivener K.L., 2010-a, Modelling ASR with "AMIE", *RILEM seminar, Technical committee TC 219 ACS*, March 2010, Ponta Delgada, Azores, 42 p.
- Dunant C. & Scrivener K.L., 2010-b, Micro-mechanical modelling of alkali-silica reaction-induced degradation using the AMIE framework, *Cement and Concrete Research*, 40, 517-525

E

- Ekolu S.O., Thomas M.D.A., Hooton R.D., 2006, Pessimism effect of externally applied chlorides on expansion due to delayed ettringite formation: Proposed mechanism, *Cement and Concrete Research*, 36, 688-696
- Ekolu S.O., Thomas M.D.A., Hooton R.D., 2007-a, Dual effectiveness of lithium salt in controlling both DEF and ASR in concretes, *Cement and Concrete Research*, 37, 942-947
- Ekolu S.O., Thomas M.D.A., Hooton R.D., 2007-b, Implications of preformed microcracking in relation to the theories of DEF, *Cement and Concrete Research*, 37, 161-165
- Escadeillas G., Aubert J.-E., Segerer M., Prince W., 2007, Some factors affecting delayed ettringite formation in heat-cured mortars, *Cement and Concrete Research*, 37, 1445-1452

F

- Famy C., Scrivener K.L., Atkinson A., Brough A.R., 2001, Influence of the storage conditions on the dimensional changes of heat-cured mortars, *Cement and Concrete Research*, 31, 795-803
- Famy C. & Taylor H.F.W., 2001, Ettringite in hydration of Portland cement concrete and its occurrence in mature concretes, *ACI Materials Journal*, 98, 350-356
- Famy C., Scrivener K. L., Brough A.R., 2002-a, Role of microstructural characterisation in understanding the mechanism of expansion due to delayed ettringite formation, *International RILEM TC 186-ISA workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation*, Villars, Switzerland, 167-172
- Famy C., Scrivener K.L., Atkinson A., Brough A.R., 2002-b, Effects of an early or a late heat treatment on the microstructure and composition of inner CSH products of Portland cement mortars, *Cement and Concrete Research*, 32, 269-278.
- Famy C., Scrivener K.L., Crumbie A.K., 2002-c, What causes differences of C-S-H gel grey levels in backscattered electron images?, *Cement and Concrete Research*, 32, 1465-1471
- Fasseu P., 1997, Alkali-réaction du béton – Essai d’expansion résiduelle sur béton durci, *Méthode d’essai des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, n°44, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 12 p.
- Fasseu P. & Michel M., 1997, Détermination de l’indice de fissuration d’un parement béton, *Méthode d’essai des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, n°47, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 13 p.
- Sous la direction de Fasseu P. et Mahut B., 2003, Aide à la gestion des ouvrages atteints de réactions de gonflement interne, *Guide technique des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 66 p.
- Fasseu P. 2010, Etudes sur les réactions sulfatiques internes – Expérimentation de traitements sur corps d’épreuve, *Les plénières du LCPC et du Sétra – Journées Ouvrage d’Art 2010*, Lille, 28 p.
- Flatt R.J. & Scherer G.W., 2008, Thermodynamics of crystallisation stresses in DEF, *Cement and Concrete Research*, 38, 325-336
- Fournier B. & Bérubé M.A., 1992, A comparison of laboratory testing methods for evaluating potential alkali-reactivity in the St. Lawrence lowlands (Quebec, Canada), *9th International Conference on Alkali Aggregate Reaction ICAAR*, London, UK, 327-337
- Fournier B. & Malhotra V., 1999, Evaluation of laboratory test methods of alkali-silica reactivity, *Cement Concrete and Aggregates*, 21(2), 173-184
- Fournier B., Ideker J.H., Folliard K.J., Thomas M.D.A., Nkinamubanzi P.-C., Chevrier R., 2009, Effect of environmental conditions on expansion in concrete due to alkali-silica reaction (ASR), *Materials characterization*, 60, 669-679
- Fu Y., Xie P., Gu P., Beaudoin J.J., 1994-a, Effect of temperature on sulphate adsorption/desorption by tricalcium silicate hydrates, *Cement and Concrete Research*, 24(8), 1428-1432

- Fu Y., Xie P., Gu P., Beaudoin J.J., 1994-b, Significance of pre-existing cracks on nucleation of secondary ettringite in steam cured cement paste, *Cement and Concrete Research*, 24(6), 1015-1024
- Fu Y., Gu P., Xie P., Beaudoin J.J., 1995, A kinetic study of DEF in hydrated Portland cement paste, *Cement and Concrete Research*, 25(1), 63-70
- Fu Y., 1996, Delayed ettringite formation in Portland cement products, University of Ottawa, 199 p.
- Fu Y. & Beaudoin J.J., 1996-a, On the distinction between delayed and secondary ettringite formation in concrete, *Cement and Concrete Research*, 26(6), 979-980
- Fu Y. & Beaudoin J.J., 1996-b, Mechanisms of Delayed Ettringite Formation in Portland cement systems, *ACI Materials Journal*, 93(4), 1-7
- Fu Y. & Beaudoin J.J., 1996-c, Microcracking as a precursor to delayed ettringite formation in cement systems, *Cement and Concrete Research*, 26(10), 1493-1498
- Fu Y., Ding J., Beaudoin J.J., 1997, Expansion of Portland cement mortar due to internal sulphate attack, *Cement and Concrete Research*, 27(9), 1299-1306.

G

- Garboczi E.J., 1997, Stress, displacement, and expansive cracking around a single spherical aggregate under different expansive conditions, *Cement and Concrete Research*, 27(4), 495-500
- Ghorab H.Y., 2002, On the chemistry of delayed ettringite formation, *International RILEM TC 186-ISA workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation*, Villars, Switzerland, 139-154
- Glasser F.P., Damidot D., Atkins M., 1995, Phase development in cement in relation to the secondary ettringite problem, *Advances in cement research*, 7(26), 57-68
- Glasser F.P., 1996, The role of sulphate mineralogy and cure temperature in delayed ettringite formation, *Cement and Concrete Composites*, 18, 187-193
- Glasser F.P., 2002, The stability of ettringite, *International RILEM TC 186-ISA workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation*, Villars, Switzerland, 43-64
- Godart B., Kittel G., Fasseu P., 1999, Manuel d'identification des réactions de dégradation interne du béton dans les ouvrages d'art, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 42 p.
- Godart B., Mahut B., Fasseu P., Michel M., 2004, A guide for aiding to the management of structures damaged by concrete expansion in France, *12th International Conference on Alkali Aggregate Reaction ICAAR*, Beijing, China, 1219-1228
- Godart B., 2006, Conclusions drawn from field and laboratory investigations for a better understanding of the behaviour of ASR-affected structures, *8th CANMET International Conference on recent advances in concrete technology*, Montreal, Canada, 301-319
- Godart B. & Divet L., 2008, The new French recommendations to prevent disorders due to delayed ettringite formation, *13th International Conference on Alkali Aggregate Reaction ICAAR*, Trondheim, Norway.

- Godart B., 2009, Méthode de suivi dimensionnel et de suivi de la fissuration des structures avec application aux structures atteintes de réaction de gonflement interne du béton, *Guide technique des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 60 p.
- Godart B. & Divet L., 2009, Réaction sulfatique interne dans les structures en béton – Mécanisme, pathologie et prévention, *Techniques de l'ingénieur*, C2 254, 1-15
- Grabowski E., Czarnecki B., Gillott J.E., Duggan C.R., Scott J.F., 1992, Rapid test of concrete expansivity due to internal sulfate attack, *ACI Materials Journal*, 89, 469-480
- Graf L.A., 2007, Effect of relative humidity on expansion and microstructure of heat-cured mortars, *Research and Development Bulletin*, RD139, Portland Cement Association, 45 p.
- Granger L. 1996, Comportement différé du béton dans les enceintes de centrales nucléaires – Analyse et modélisation, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, *ERLPC*, OA 21, 381 p.
- Granger L., Torrenti J.-M., Acker P., 1997-a, Thoughts about drying shrinkage: Scale effects and modelling, *Materials and Structures*, 30, 96-105
- Granger L., Torrenti J.-M., Acker P., 1997-b, Thoughts about drying shrinkage: Experimental results and quantification of structural drying creep, *Materials and Structures*, 30, 588-598
- Grasley Z. C., Lange D. A., D'Ambrosia M. D., Villalobos-Chapa S., 2006, Humidity in concrete, *ACI Concrete International*, 28(10), 51-57
- Grattan-Bellew P.E., Beaudoin J.J., Vallée V.-G., 1998, Effect of aggregate particle size and composition on expansion of mortar bars due to delayed ettringite formation, *Cement and Concrete Research*, 28(8), 1147-1156
- Grimal E., 2007, Caractérisation des effets du gonflement provoqué par la réaction alcali-silice sur le comportement mécanique d'une structure en béton, thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier – Toulouse III, Toulouse, 200 p.
- Grimal E., Sellier A., Le Pape Y., Bourdarot E., 2008-a, Creep, shrinkage and anisotropic damage in alkali-aggregate reaction swelling mechanism – part I: a constitutive model, *ACI Materials Journal*, 105(26), 227-235
- Grimal E., Sellier A., Le Pape Y., Bourdarot E., 2008-b, Creep, shrinkage and anisotropic damage in alkali-aggregate reaction swelling mechanism – part II: identification of model parameters and application, *ACI Materials Journal*, 105(26), 236-242
- Grimal E., Sellier A., Multon S., Le Pape Y., Bourdarot E., 2010, Concrete modelling for expertise of structures affected by alkali aggregate reaction, *Cement and Concrete Research*, 40, 502-507
- Gruszczinski E., Brown P.W., Bothe J.V., 1993, The formation of ettringite at elevated temperature, *Cement and Concrete Research*, 23, 981-987

H

- Hanehara S., Oyamada T., Fukuda S., Fujiwara T., 2008-a, Delayed ettringite formation and alkali aggregate reaction, *8th International Conference on Creep, Shrinkage*

- and Durability of Concrete and Concrete Structures CONCREEP'08*, Ise-Shima, Japan, 1051-1056
- Hanehara S., Oyamada T., Fujiwara T., 2008-b, Reproduction of delayed ettringite formation in concrete and its mechanism, *1st International Conference on Microstructure Related Durability of Cementitious Composites*, Nanjing, China, 143-152
- Heinz D. & Ludwig U., 1987, Mechanism of secondary ettringite formation in mortars subjected to heat treatment, *ACI SP 100*, Detroit, USA, 2059-2071
- Heinz D., Ludwig U., Rüdiger I., 1989, Delayed ettringite formation in heat treated mortars and concretes, *Concrete Precasting, Plant and Technology*, 11, 56-61.
- Heinz D., Kalde M., Ludwig U., Rüdiger I., 1999, Present state of investigation on damaging late ettringite formation (DLEF) in mortars and concretes, *ACI SP-177 Ettringite – The sometimes host of destruction*, 1-13
- Hime W.G. & Marusin S.L., 1999, Delayed ettringite formation: many questions and some answers, *ACI SP-177 Ettringite – The sometimes host of destruction*, 199-206
- Hobbs D.W., 1999, Expansion and cracking in concrete associated with delayed ettringite formation, *ACI SP-177 Ettringite – The sometimes host of destruction*, 159-181
- Hooton R.D., Rogers C.A., Ramlochan T., 2010, The Kingston outdoor exposure site for ASR – after 16 years what have we learned?, *RILEM seminar, Technical committee TC 219 ACS*, March 2010, Ponta Delgada, Azores
- Sous la direction de Humbert P. & Mestat P. et al., 2005, Numéro spécial CESAR-LCPC, *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 256-257, 249 p.

I

- Idorn G.M., 2002, A discussion of the review paper “Delayed Ettringite Formation”, *Cement and Concrete Research*, 32, 989-990

J

- Johansen V., Thaulow N., Skalny J., 1993, Simultaneous presence of alkali-silica gel and ettringite in concrete, *Advances in Cement Research*, 5(17), 23-29
- Johansen V. & Thaulow N., 1999, Heat curing and late formation of ettringite, *ACI SP-177 Ettringite – The sometimes host of destruction*, 47-64
- Johansen V. & Osbaeck B., 2002, Ettringite needed in gaps?, *International RILEM TC 186-ISA workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation*, Villars, Switzerland, 173-177
- Jolicoeur C., Bilodeau J., Simard M.A., 1994, Etude calorimétrique de l’hydratation du ciment – Détermination de l’énergie d’activation, Rapport d’étape, *Rapport interne LCPC*.
- Joly M., 1999, Brevet : Capteur à fil vibrant notamment destiné à mesurer les déformations d’une structure, n° de dépôt 9915522 (le 09/12/1999), n° de parution 2802299 (le 15/06/2001).

K

- Kelham S., 1996, The effect of cement composition and fineness on expansion associated with delayed ettringite formation, *Cement and Concrete Composites*, 18, 171-179.
- Kelham S., 1999, Influence of cement composition on volume stability of mortar, *ACI SP-177 Ettringite – The sometimes host of destruction*, 27-45
- Kelham S., 2002, Effects of cement parameters on expansion associated with DEF, *International RILEM TC 186-ISA workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation*, Villars, Switzerland, 197-211
- Kert C., 2009, L'amélioration de la sécurité des barrages et ouvrages hydrauliques, *Le Moniteur des Travaux Publics et du Bâtiment*, n°5495, 48 p.
- Kjelssen K.O. & Detwiler R.J., 1992, Reaction kinetics of Portland cement mortars hydrated at different temperatures, *Cement and Concrete Research*, 22, 112-120
- Sous la direction de Kretz, T., Godart, B. & Divet, L., 2007, Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne, *Guide technique des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 59 p.
- Kurdowski W., 2002, Role of delayed release of sulphates from clinker in DEF, *Cement and Concrete Research*, 32, 401-407
- Kurdowski W. & Duszak S., 2002, Can addition of limestone eliminate the expansion of the mortars due to DEF, *International RILEM TC 186-ISA workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation*, Villars, Switzerland, 229-235
- Kuzel H.J. & Meyer H., 1993, Mechanism of ettringite and monosulphate formation in cement and concrete in presence of CO_3^{2-} , *15th International Conference on Cement Microscopy Association*, Dallas, TX, 191-203
- Kuzel H.J., 1996, Initial hydration reactions and mechanisms of delayed ettringite formation in Portland cements, *Cement and Concrete Composites*, 18, 195-203

L

- Laplante P., 1993, Propriétés mécaniques des bétons durcissants : analyse comparée des bétons classiques et à très hautes performances, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, *ERLPC*, OA 13, 299 p.
- Larive C. 1998, Apports combinés de l'expérimentation et de la modélisation à la compréhension de l'alcali-réaction et de ses effets mécaniques, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, *ERLPC*, OA 28, 404 p.
- Lawrence B.L., Myers J.J., Carrasquillo R.L., 1999, Premature concrete deterioration in Texas Department of Transportation precast elements, *ACI SP-177 Ettringite – The sometimes host of destruction*, 141-158
- Lawrence C.D., 1995-a, Delayed Ettringite Formation: An issue?, *Materials Science of Concrete*, 4, 113-154
- Lawrence C.D., 1995-b, Mortar expansions due to DEF – Effects of curing period and temperature, *Cement and Concrete Research*, 25(4), 903-914

- Lawrence C.D., 1999, Long term expansion of mortars and concretes, *ACI SP-177 Ettringite – The sometimes host of destruction*, 105-123
- Leklou N., 2008, Contribution à la connaissance de la réaction sulfatique interne, thèse de Doctorat, Université Paul-Sabatier Toulouse III, 210 p.
- Leklou N., Aubert J.-E., Escadeillas G., 2008, Microscopic observation of samples affected by delayed ettringite formation, *Materials and Structures*, 42(10), 1369-1378
- Li K., Coussy O., Larive C., 2004, Modélisation chimico-mécanique du comportement des bétons affectés par la réaction d'alcali-silice – Expertise numérique des ouvrages d'art dégradés, *ERLPC*, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, OA 43, 202 p.
- Lothenbach B., Winnefeld F., Adler C., Wieland E., Lunk P., 2007, Effect of temperature on the pore solution, microstructure and hydration products of Portland cement pastes, *Cement and Concrete Research*, 37, 483-491

M

- MacDonald D., 1998, Delayed ettringite formation and heat curing - implications of the work of Kelham, *Cement and Concrete Research*, 28(12), 1827-1830
- Martin R.-P., Siegert D., Toutlemonde F., 2008, Experimental analysis of concrete structures affected by DEF – Influence of moisture and restraint, *3rd International symposium on thermo-hydronechanical and chemical coupling in geomaterials and applications GEOPROC*, Lille, France, 589-596
- Martin R.-P. & Toutlemonde F., 2010, Mise au point d'une cure thermique représentative de l'échauffement d'une pièce massive de béton, *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, n°278, à paraître
- Martin R.-P., Renaud J.-C., Toutlemonde F., 2010, Experimental investigations concerning combined delayed ettringite formation and alkali-aggregate reaction, *6th International Conference on Concrete under Severe Conditions CONSEC*, Merida, Mexico, 287-295
- Marusin S.L., 1994, A simple treatment to distinguish alkali-silica gel from delayed ettringite formations in concrete, *Magazine of Concrete Research*, 46(168), 163-166
- Mather B., 1969, Sulfate soundness, sulfate attack and expansive cement in concrete, *RILEM International symposium on concrete durability*, Technical University of Prague, C209-220
- Mehta P.K., 1973, Mechanism of expansion associated with ettringite formation, *Cement and Concrete Research*, 3, 1-6
- Meland I., Justnes H., Lindgård J., 1997, Durability problems related to delayed ettringite formation and/or alkali aggregate reaction, *10th International Congress on the Chemistry of Cement*, Gothenburg, Sweden, 4.
- Mensi R., Acker P., Attolou A., 1988, Séchage du béton : analyse et modélisation, *Materials and Structures*, 21, 3-12
- Mielenz R.C., Marusin S.L., Hime W.G., Jugovic Z.T., 1995, Investigation of prestressed concrete railway tie distress, *ACI Concrete International*, 17, 62-68

- Mineralogical Society of America, 2001, Handbook of mineralogy, <http://www.handbookofmineralogy.org/>
- Mingyu H., Fumei L., Mingshu T., 2006, The thaumasite form of sulfate attack in concrete of Yongan dam, *Cement and Concrete Research*, 36, 2006-2008
- Multon S., 2004, Evaluation expérimentale et théorique des effets mécaniques de l'alcali-réaction sur des structures modèles, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, *ERLPC*, OA 46, 423 p.
- Multon S., Merliot E., Joly M., Toutlemonde F., 2004, Water distribution in beams damaged by alkali-silica reaction: global weighing and local gammadensitometry, *Materials and Structures*, 37, 282-288
- Multon S. & Toutlemonde F., 2004, Water distribution in concrete beams, *Materials and Structures*, 37, 378-386
- Multon S. & Toutlemonde F., 2006, Effect of applied stresses on alkali-silica reaction-induced expansions, *Cement and Concrete Research*, 36(5), 912-920
- Multon S., Barin F.-X., Godart B., Toutlemonde F., 2008, Estimation of the residual expansion of concrete affected by alkali silica reaction, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20(1), 54-62

N

- Naar R., 2009, Modélisation du comportement mécanique du béton par approche multi-physique (couplage chimie-mécanique) : application au diagnostic des bétons d'ouvrage atteints par la réaction alcali-silice, thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 162 p.
- Ngo T.-T., 2005, Etude comparative de trois lois de couplage hydro-gonflement dans un béton atteint par la réaction alcali-silice, Mémoire de Master Recherche, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 34 p.

O

- Odler I. & Chen Y., 1995, Effect of cement composition on the expansion of heat-cured cement pastes, *Cement and Concrete Research*, 25(4), 853-862
- Odler I. & Chen Y., 1996, On the delayed expansion of heat cured Portland cement pastes and concretes, *Cement and Concrete Composites*, 18, 181-185
- Odler I. & Colan-Subauste J., 1999, Investigations on cement expansion associated with ettringite formation, *Cement and Concrete Research*, 29, 731-735
- Owsiak A., 2008, Effects of alkali-silica reaction on the rate delayed ettringite formation in steam cured mortars, *13th International Conference on Alkali Aggregate Reaction ICAAR*, Trondheim, Norway

P

- Patel H.H., Bland C.H., Poole A.B., 1995, The microstructure of concrete cured at elevated temperatures, *Cement and Concrete Research*, 25(3), 485-490

- Paul M. & Glasser F.P., 2000, Impact of prolonged warm (85°C) moist cure on Portland cement paste, *Cement and Concrete Research*, 30, 1869-1877
- Pavoine A., 2003, Evaluation du potentiel de réactivité des bétons vis-à-vis de la formation différée de l'ettringite, thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie Paris VI, 229 p.
- Pavoine A., Divet L., Fenouillet S., 2006-a, A concrete performance test for delayed ettringite formation: Part I optimisation, *Cement and Concrete Research*, 36, 2138-2143
- Pavoine A., Divet L., Fenouillet S., 2006-b, A concrete performance test for delayed ettringite formation: Part II validation, *Cement and Concrete Research*, 36, 2144-2151
- Pavoine A. & Divet L., 2007, Réactivité d'un béton vis-à-vis d'une réaction sulfatique interne, *Méthode d'essai des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, n°66, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 19 p.
- Pavoine A. & Divet L., 2009, Réaction sulfatique interne au béton – Essai d'expansion résiduelle sur carotte de béton extraite de l'ouvrage, *Méthode d'essai des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, n°67, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 28 p.
- Petrov N., 2003, Effets combinés de différents facteurs sur l'expansion des bétons causée par la formation différée d'ettringite, thèse de Doctorat, Université de Sherbrooke, 189 p.
- Petrov N. & Tagnit-Hamou A., 2004, Is microcracking really a precursor to DEF and consequent expansion?, *ACI Materials Journal*, 101(6), 442-447
- Pettifer K. & Nixon P.J., 1980, Alkali-metal sulfate – factor common to both alkali aggregate and sulfate attack on concrete, *Cement and Concrete Research*, 10, 173-181.
- Ping X. & Beaudoin J.J., 1992-a, Mechanism of sulphate expansion I. Thermodynamic principle of crystallisation pressure, *Cement and Concrete Research*, 22, 631-640
- Ping X. & Beaudoin J.J., 1992-b, Mechanism of sulphate expansion II. Validation of thermodynamic theory, *Cement and Concrete Research*, 22, 845-854
- Poole A.B., Patel H.H., Sheikh V., 1996, Alkali silica and ettringite expansions in 'steam cured' concretes, *10th International Conference on Alkali Aggregate Reaction ICAAR*, Melbourne, Australia, 943-948
- Poyet S., 2003, Etude de la dégradation des ouvrages en béton atteints par la réaction alcali-silice : approche expérimentale et modélisation numérique multi-échelles des dégradations dans un environnement hydro-chemo-mécanique variable, thèse de Doctorat, Université de Marne-La-Vallée, Paris, 237 p.
- Poyet S. Sellier A., Capra B., Foray G., Torrenti J.-M., Cognon H., Bourdarot E., 2007, Chemical modelling of alkali silica reaction: influence of the reactive aggregate size distribution, *Materials and Structures*, 40, 229-239

R

- Ramlochan T., Zacarias P., Thomas M.D.A., Hooton R.D., 2003, The effect of pozzolans and slag on the expansion of mortars cured at elevated temperature - Part I: Expansive behaviour, *Cement and Concrete Research*, 33, 807-814
- Ramlochan T., Thomas M.D.A., Hooton R.D., 2004, The effect of pozzolans and slag on the expansion of mortars cured at elevated temperature - Part II: Microstructural and microchemical investigations, *Cement and Concrete Research*, 34, 1341-1356
- Reinhardt H.W. & Cornelissen H.A.W., 1985, Zeitstandzugversuche an Beton, *Baustoffe*, 85, 162-167
- Rivard P. & Ballivy G., 2005, Assessment of the expansion related to alkali-silica reaction by the Damage Rating Index method, *Construction and Building Materials*, 19, 83-90
- Rust C.K., 2009, Role of relative humidity in concrete expansion due to alkali-silica reaction and delayed ettringite formation: relative humidity thresholds, measurement methods and coatings to mitigate expansion, Thesis, University of Texas, Austin, 106 p.

S

- Sahu S. & Thaulow N., 2004, Delayed ettringite formation in Swedish concrete railroad ties, *Cement and Concrete Research*, 34, 1675-1681
- Sakai E., Nikaido Y., Itoh T., Daimon M., 2004, Ettringite formation and microstructure of rapid hardening cement, *Cement and Concrete Research*, 34, 1669-1673
- Santos Silva A., Bettencourt Ribeiro A., Jalali S., Divet L., 2006, The use of fly ash and metakaolin for the prevention of alkali-silica reaction and delayed ettringite formation in concrete, *International RILEM workshop on performance based evaluation and indicators for concrete durability*, Madrid, Spain
- Santos Silva A., Gonçalves A.F., Pipa M., 2008, Diagnosis and prognosis of Portuguese concrete railway sleepers degradation – a combination of ASR and DEF, *13th International Conference on Alkali Aggregate Reaction ICAAR*, Trondheim, Norway
- Santos Silva A., Soares D., Matos L., Salta M., Divet L., Pavoine A., Candeias A., Mirão J., 2010, Influence of mineral additions in the inhibition of DEF in cement based materials – a microstructural characterization, *Advanced Materials Forum V*, 1272-1279
- Saouma V. & Perotti L., 2006, Constitutive model for alkali-aggregate reactions, *ACI Materials Journal*, 103(3), 194-202
- Scherer G.W., 1999, Crystallization in pores, *Cement and Concrete Research*, 29, 1347-1358
- Scherer G. W., 2002, Factors affecting crystallisation pressure, *International RILEM TC 186-ISA workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation*, Villars, Switzerland, 139-154
- Scherer G.W., 2004, Stresses from crystallisation of salt, *Cement and Concrete Research*, 34, 1613-1624

- Schmidt T., Lotenbach B., Romer M., Neuenschwander J., Scrivener K.L., 2009, Physical and microstructural aspects of sulphate attack on ordinary and limestone blended Portland cements, *Cement and Concrete Research*, 39, 1111-1121
- Scrivener K.L., 1992, The effect of heat treatment on inner product C-S-H, *Cement and Concrete Research*, 22, 1224-1226
- Scrivener K.L. & Taylor H.F.W., 1993, Delayed ettringite formation: a microstructural and microanalytical study, *Advances in Cement Research*, 5(20), 139-146
- Scrivener K.L. & Lewis M.C., 1999, Effect of heat curing on expansion of mortars and composition of calcium silicate hydrate gel, *ACI SP-177 Ettringite – The sometimes host of destruction*, 93-104
- Scrivener K.L., Damidot D., Famy C., 1999, Possible mechanisms of expansion of concrete exposed to elevated temperatures during curing (also known as DEF) and implications for avoidance of field problems, *Cement, Concrete and Aggregates*, 21(1), 93-101
- Scrivener K.L., 2002, Summary of discussions during workshop, *International RILEM TC 186-ISA workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation*, Villars, Switzerland, 277-297
- Scrivener K., Guidoum A, Mathier V., 2002, Role of cracks in delayed ettringite formation, *International RILEM TC 186-ISA workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation*, Villars, Switzerland, 259-262
- Scrivener K.L. & Skalny J.P., 2005, Conclusions of the international RILEM TC 186-ISA workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation, *Materials and Structures*, 38, 659-663
- Scrivener K.L., 2008, Importance of microstructural understanding for durable and sustainable concrete, *1st International Conference on Microstructure Related Durability of Cementitious Composites*, Nanjing, China, 333-344.
- Sedran T. & de Larrard F., 1994, RENE-LCPC – Un logiciel pour optimiser la granularité des matériaux de Génie Civil, *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 194, 87-93
- Seignol J.-F., Ngo T.-T., Toutlemonde F., 2006, Modelling of the coupling between moisture and alkali-silica reaction in concrete, *International Conference on Computational Modelling of Concrete Structures Euro-C 2006*, Mayrhofen, Austria, 639-646
- Seignol J.-F., Baghdadi N., Toutlemonde F., 2009, A macroscopic chemo-mechanical model aimed at re-assessment of delayed ettringite formation affected concrete structures, *1st International Conference on Computational Technologies in Concrete Structures CTCS'09*, Jeju, Korea, 422-440
- Sellier A., Bournazel J.P., Mébarki A., 1995, Une modélisation de la réaction alkali-granulat intégrant une description des phénomènes aléatoires locaux, *Materials and Structures*, 28, 373-383
- Sellier A., Bournazel J.P., Mébarki A., 1996, Modelling the alkali-aggregate reaction within a probabilistic framework, *10th International Conference on Alkali Aggregate Reaction ICAAR*, Melbourne, Australia

- Sellier A., Bourdarot E., Multon S., Cyr M., Grimal E., 2008, Assessment of the residual expansion for expertise of structures affected by AAR, *13th International Conference on Alkali Aggregate Reaction ICAAR*, Trondheim, Norway
- Sellier A., Bourdarot E., Multon S., Cyr M., Grimal E., 2009, Combination of structural monitoring and laboratory tests for assessment of alkali-aggregate reaction swelling: application to gate structure dam, *ACI Materials Journal*, 106(3), 281-290
- Shao Y., Lynsdale C.J., Lawrence C.D., Sharp J.H., 1997, Deterioration of heat-cured mortars due to the combined effect of delayed ettringite formation and freeze/thaw cycles, *Cement and Concrete Research*, 27(11), 1761-1771
- Shayan A. & Quick G.W., 1992, Microscopic features of cracked and uncracked concrete railway sleepers, *ACI Materials Journal*, 89(4), 348-361
- Shayan A., Quick G.W., Lancucki C.J., 1993, Morphological, mineralogical and chemical features of steam-cured concretes containing densified silica fume and various alkali levels, *Advances in Cement Research*, 20(5), 151-162
- Shayan A. & Quick G.W., 1994, Alkali-aggregate reaction in concrete railway sleepers from Finland, *16th International Conference on Cement Microscopy*, Duncanville, TX, 69-79
- Shayan A. & Ivanusec I., 1996, An experimental clarification of the association of Delayed Ettringite Formation with Alkali-Aggregate Reaction, *Cement and Concrete Composites*, 18, 161-170
- Shimada Y. & Young F.J., 2004, Thermal stability of ettringite in alkaline solutions at 80°C, *Cement and Concrete Research*, 34, 2261-2268
- Shimada Y., 2005, Chemical path of ettringite formation in heat-cured mortar and its relationship to expansion, PhD Thesis, Northwestern University, Evanston, IL, 457p.
- Siedel H., Hempel S., Hempel R., 1993, Secondary ettringite formation in heat treated Portland cement concrete: influence of different W/C ratios and heat treatment temperatures, *Cement and Concrete Research*, 23, 453-461
- Siegert D., Multon S., Toutlemonde F., 2005, Resonant frequencies monitoring of alkali aggregate reaction (AAR) damaged concrete beams, *Experimental Techniques*, 29(6), 37-40
- Sims I. & Nixon P., 2003, RILEM recommended test method AAR-0: Detection of alkali-reactivity potential in concrete – Outline guide to the use of RILEM methods in assessments of aggregates for potential alkali-reactivity, *Materials and Structures*, 36, 472-479
- Skalny J.P., 2002, Internal Sulfate Attack – Points of agreement and disagreement, *International RILEM TC 186-ISA workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation*, Villars, Switzerland, 265-276
- Smaoui N., 2003, Contribution à l'évaluation du comportement structural des ouvrages d'art affectés de réaction alcali-silice (RAS), thèse de Doctorat, Faculté des Sciences et de Génie de l'Université Laval, Québec, 365 p.

T

- Tagnit-Hamou A. & Petrov N., 2004, A new method for evaluating the risk of DEF, *Cement, Concrete and Aggregates*, 26(2), 52-57
- Taylor H.F.W., Famy C., Scrivener K.L., 2001, Delayed Ettringite Formation, *Cement and Concrete Research*, 31, 683-693
- Tepponen P. & Ericksson B.-E., 1987, Damages in concrete railway sleepers in Finland, *Nordic Concrete Research*, 6, 199-209
- Thaulow N., Jakobsen U.H., Clark B., 1996, Composition of alkali silica gel and ettringite in concrete railroad ties: SEM-EDX and X-ray diffraction analyses, *Cement and Concrete Research*, 26(2), 309-318
- Thomas M.D.A. & Ramlochan T., 2002, Field cases of Delayed Ettringite Formation, *International RILEM TC 186-ISA workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation*, Villars, Switzerland, 85-97
- Thomas M.D.A., Folliard K., Drimalas T., Ramlochan T., 2008, Diagnosing DEF in concrete structures, *Cement and Concrete Research*, 38, 841-847
- Thomas M.D.A., Nixon P., Haynes C., Dunster A., Blackwell B., 2010, Effect of fly ash on the expansion of concrete due to ASR – Findings from the BRE exposure site, *RILEM seminar, Technical committee TC 219 ACS*, March 2010, Ponta Delgada, Azores
- Torrenti J.-M., Aristaghes P., Dombernovski K., Edon F., Guenot I., Monachon P., 1995, La simulation des effets thermiques dans le béton au jeune âge : exemples d'applications, *Annales de l'institut technique du bâtiment et des travaux publics*, 535, 27 p.
- Torrenti J.-M., 1996, Comportement mécanique du béton – Bilan de six années de recherche, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, *ERLPC*, OA 23, 109 p.
- Torrenti J.-M., Dantec P., Boulay C., Semblat J.-F., 1999-a, Projet de processus d'essai pour la détermination du module de déformation longitudinale du béton, *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 220, 79-81
- Torrenti J.-M., Granger L., Diruy M., Genin P., 1999-b, Modeling concrete shrinkage under variable ambient conditions, *ACI Materials Journal*, 96(5), 35-39
- Sous la direction de Torrenti J.-M., 2010, Numéro spécial « calorimétrie sur béton », *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, n° 278, à paraître
- Tosun K., 2006, Effect of SO₃ content and fineness on the rate of delayed ettringite formation in heat cured Portland cement mortars, *Cement and Concrete Composites*, 28, 761-772
- Toutlemonde F. & Le Maou F., 1996, Protection des éprouvettes de béton vis-à-vis de la dessiccation, *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 203, 105-119
- Toutlemonde F., 1999, Quelques réflexions sur la détermination du module d'élasticité du béton, en vue de l'élaboration d'un mode opératoire LPC, *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 220, 75-78
- Toutlemonde F., Multon S., Seignol J.-F., Bourdarot E., Jeanpierre A., 2004, Extensive data basis for validating ASR models: a French contribution to the re-assessment of

ASR-affected structures, *12th International Conference on Alkali Aggregate Reaction ICAAR*, Beijing, China, 31-40

U

Ulm F.-J., Coussy O., Li K., Larive C., 2000, Thermo-chemo-mechanics of ASR expansion in concrete structures, *Journal of Engineering Mechanics*, 126(3), 233-242

V

Vandamme M, Ulm F.-J., Fonollosa, 2010, Nanogranular packing of C-S-H at substoechiometric conditions, *Cement and Concrete Research*, 40, 14-26

W

Waller V., 2000, Relations entre compositions des bétons, exothermie en cours de prise et résistance en compression, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, *ERLPC*, OA 35, 317 p.

Wikipedia, 2010, <http://fr.wikipedia.org/wiki/Ettringite>

Wood J.G.M. & Koran D.K., 1992, Revision of the institution of structural engineers report – structural effects of alkali silica reaction, *9th International Conference on Alkali Aggregate Reaction ICAAR*, London, UK, 1107-1112

Wood J.G.M., Nixon P.J., Livesey P., 1996, Relating ASR structural damage to concrete composition and environment, *10th International Conference on Alkali Aggregate Reaction ICAAR*, Melbourne, Australia, 450-457

Wood J.G.M., 2010, Moisture: the un-quantified contributor to AAR, *RILEM seminar, Technical committee TC 219 ACS*, March 2010, Ponta Delgada, Azores

Y

Yan P., Qin X., Wenyan Y., Peng J., 2001, The semiquantitative determination and morphology of ettringite in pastes containing expansive agent cured in elevated temperature, *Cement and Concrete Research*, 31, 1285-1290

Yang R., Lawrence C.D., Sharp J.H., 1996, Delayed ettringite formation in 4-year old cement pastes, *Cement and Concrete Research*, 26(11), 1649-1659.

Yang R., Lawrence C.D., Lynsdale C.J., Sharp J.H., 1999-a, Delayed ettringite formation in heat-cured Portland cement mortars, *Cement and Concrete Research*, 29, 17-25

Yang R., Lawrence C.D., Sharp J.H., 1999-b, Effect of type of aggregate on delayed ettringite formation, *Advances in Cement Research*, 11(3), 119-132

Z

Zhang Z., Olek J., Diamond S., 2002-a, Studies on delayed ettringite formation in early-age, heat-cured mortars I. Expansion measurements, changes in dynamic modulus of elasticity and weight gains, *Cement and Concrete Research*, 32, 1729-1736

Zhang Z., Olek J., Diamond S., 2002-b, Studies on delayed ettringite formation in early-age, heat-cured mortars II. Characteristics of cement that may be susceptible to DEF, *Cement and Concrete Research*, 32, 1737-1742

Index des figures

Figure 1-1 : représentation schématique de la structure cristalline de l'ettringite (d'après Scrivener et al. 1999)	30
Figure 1-2 : évolution des quantités d'ettringite déterminées par méthode DRX dans un mortier non traité thermiquement (WMRT) et dans un mortier soumis à une cure thermique de 100°C durant 12 heures (WM100) (Yang et al. 1999-a)	31
Figure 1-3 : évolution des domaines de stabilité du système CaO-Al ₂ O ₃ -CaSO ₄ -H ₂ O à 25°C (a.), 50°C (b.) et 85°C (c.) (Damidot & Glasser 1992 et Damidot & Glasser 1993)	34
Figure 1-4 : évolution des domaines de stabilité du système CaO-Al ₂ O ₃ -CaSO ₄ -H ₂ O à 25°C sans alcalins (a.) et avec une concentration en sodium de 0,05 mol/l (Damidot & Glasser 1992)	35
Figure 1-5 : comparaison de l'évolution de la quantité d'ettringite mesurée par analyse semiquantitative RX dans un mortier et gonflements associés (Scrivener & Lewis 1999)	42
Figure 1-6 : mécanisme de gonflement proposé par (Taylor et al. 2001) issu de la conversion en ettringite des monosulfates dispersés dans les outer CSH en fin de cure	46
Figure 1-7 : matériau suite à un gonflement homogène de la pâte issu d'une conversion de monosulfate en ettringite avant dissolution – reprécipitation de l'ettringite (Famy et al. 2002-a) – en vert, monosulfate, en rouge, ettringite	47
Figure 1-8 : matériau suite à un gonflement homogène de la pâte issu d'une conversion de monosulfate en ettringite après dissolution – reprécipitation de l'ettringite (Famy et al. 2002-a) – en rouge, ettringite	47
Figure 1-9 : effet de la teneur en SO ₃ du ciment sur l'amplitude des gonflements (cure de 90°C/12 h) (Kelham 1996)	51
Figure 1-10 : effet de pessimum du ratio SO ₃ /Al ₂ O ₃ selon a. (Heinz et al. 1999) b. (Zhang et al. 2002-b)	52
Figure 1-11 : représentation schématique des possibilités de formation d'ettringite (E) et de monosulfate (M) après cure thermique en fonction des teneurs en SO ₃ et Al ₂ O ₃ d'un ciment en considérant tous les autres paramètres comme constants (Taylor et al. 2001)	53
Figure 1-12 : adsorption des sulfates par les CSH (S/Si) en fonction de la concentration en sulfates de la solution interstitielle et de la température (Barbarulo et al. 2002)	55
Figure 1-13 : observation microscopique (technique des électrons rétrodiffusés) d'un mortier soumis après une précure de 4 h à une cure thermique de 90°C / 12 h puis à un stockage en eau à température ambiante durant 200 jours. a. grain de C ₃ S anhydre b. CSH formés lors de la cure thermique c. CSH formés lors de la phase de conservation en eau p. Portlandite (Famy et al. 2002-b)	57
Figure 1-14 : effets de la présence d'alcalins sur le développement de gonflements ; a. Suivi dimensionnel d'un mortier conservé dans des solutions de différentes concentrations ([P] = concentration en alcalins de la solution interstitielle avant immersion) b. Evolution de la lixiviation des alcalins d'un mortier conservé en eau (Famy et al. 2001)	60
Figure 1-15 : estimation des potentiels de gonflement par le modèle de (Baghdadi et al. 2008-b) (D = days)	63
Figure 1-16 : gonflement d'un mortier (cure thermique 90°C/12 h) soumis à différentes températures de conservation (a. conservation continue à 20°C ; b. conservation à 20°C durant 98 jours puis stockage à 38°C ; c. conservation à 38°C durant 98 jours puis stockage à 20°C ; d. conservation continue à 38°C) (Flatt & Scherer 2008)	65
Figure 1-17 : évolution de la pression développée en fonction de la quantité d'ettringite présente dans un mortier et de la température de conservation (Flatt & Scherer 2008)	66
Figure 1-18 : effet de pessimum des expansions de RAG sur celles de RSI (Ekolu et al. 2007-b)	74
Figure 1-19 : effets de la présence d'une armature sur les gonflements d'un prisme (Lawrence 1995-a)	77
Figure 1-20 : conditions d'occurrence de la RSI d'après a. (Collepari 1999) b. (Escadeillas et al. 2007) c. (Hanehara et al. 2008-a) d. (Thomas & Ramlochan 2002)	77
Figure 1-21 : comparaison entre gonflement mesuré et gonflement estimé par a. (Kelham 1996), b. (Hobbs 1999) (f = finesse du ciment en m ² /kg) et c. (Zhang et al. 2002-b)	82
Figure 1-22 : cycles de chauffe / refroidissement appliqués durant le test de Duggan (Grabowski et al. 1992)	84
Figure 1-23 : corrélation entre Damage Index (DI) et résistance en compression (Boenig et al. 2009)	89
Figure 1-24 : logigramme de gestion des ouvrages atteints de RGI d'après (Li et al. 2004)	90
Figure 1-25 : estimation d'un faciès de fissuration par un modèle mésoscopique (cas de l'expansion d'un gel de RAG situé aux interfaces pâte/granulat– Dunant & Scrivener 2010-b)	91
Figure 1-26 : exemple d'application du modèle de (Baghdadi 2008) au recalcul d'un pylône de pont à haubans atteint de RSI	92
Figure 2-1 : nomenclature des éprouvettes de gonflement libre	103
Figure 2-2 : nomenclature des éprouvettes de gonflement libre BT et R3	104
Figure 2-3 : principe d'évaluation des effets de l'âge du carottage	105
Figure 2-4 : nomenclature des éprouvettes d'expansion résiduelle	105
Figure 2-5 : nomenclature des éprouvettes de gonflement libre R2 conservées en solution alcaline	106
Figure 2-6 : nomenclature des éprouvettes de gonflement libre R2 conservées à 20°C	107
Figure 2-7 : nomenclature des éprouvettes de gonflement sous contraintes	108
Figure 2-8 : nomenclature des éprouvettes de caractérisation mécanique	110
Figure 2-9 : nomenclature des éprouvettes de caractérisation de la lixiviation des alcalins en phase de cure thermique	111
Figure 2-10 : prélèvements des éprouvettes pour caractérisation de la lixiviation	111
Figure 2-11 : préparation des échantillons pour caractérisation de la lixiviation des alcalins en phase de stockage (a. découpe d'une demi cylindre moulé pour prélèvement de la partie centrale ; b. échantillon avant broyage – à gauche, échantillon central = cœur – à droite, échantillon de surface)	112
Figure 2-12 : nomenclature des éprouvettes de caractérisation de la lixiviation des alcalins en phase de stockage	112
Figure 2-13 : dispositifs d'appui des poutres (a. barres d'appui après décoffrage ; b. poutre en position sur ses appuis glissants)	113
Figure 2-14 : conditions de conservation des poutres au cours du temps (vue en coupe)	114
Figure 2-15 : représentation schématique des essais	118
Figure 2-16 : caractérisation du comportement exothermique des matériaux par essai Q _{AB}	121
Figure 2-17 : observations microscopiques des bétons à 28 jours	124
Figure 2-18 : simulation de la température au cœur de corps d'épreuve soumis à un échauffement constant (module TEXO CESAR-LCPC)	126
Figure 2-19 : profil de traitement thermique des corps d'épreuve	130
Figure 2-20 : maillages et points de post-traitement (a. poutre ; b. éprouvette 11-22)	131
Figure 2-21 : réponse thermique théorique d'une poutre – formule R1	132
Figure 2-22 : écart de température entre centre et bord de section d'une poutre – formule R1	132

Figure 2-23 : champs de température dans une poutre à différents instants caractéristiques – formule R1 (a. $t = 5,5$ h ; b. $t = 9$ h ; c. $t = 120$ h)	132
Figure 2-24 : écart de température entre le cœur d'une poutre et celui d'une éprouvette – formule R1	133
Figure 2-25 : réponse thermique théorique d'une poutre – formule NR	134
Figure 2-26 : a. évolution des contraintes principales σ_1 en phase de refroidissement b. champs de contrainte principale σ_1 à $t = 102$ h	134
Figure 2-27 : dispositif de traitement thermique (a. schéma de principe ; b. vue d'ensemble du système)	135
Figure 2-28 : exemple de réalisation expérimentale de la cure thermique	136
Figure 2-29 : emplacement des mesures de température dans les poutres (section à 0,60 m de l'about Sud)	137
Figure 2-30 : réponse thermique expérimentale de P2 – phase chauffe	138
Figure 2-31 : réponse thermique expérimentale de P2 – palier de température	138
Figure 2-32 : réponse thermique expérimentale de P2 - refroidissement	138
Figure 2-33 : écarts de température enregistrés au sein de P2 durant la cure thermique	139
Figure 2-34 : évolution de température au point M4 (0,27 m) en phase de chauffe – poutre P2	139
Figure 2-35 : écarts de température entre les points M4 (0,27 m) et M1 (0,04 m)	140
Figure 2-36 : écart de température entre le cœur d'une poutre (point M4) et celui d'une éprouvette (formule R1)	140
Figure 2-37 : réponse thermique expérimentale de P1 – chauffe	141
Figure 2-38 : réponse thermique expérimentale de P1 – palier de température	142
Figure 2-39 : réponse thermique expérimentale de P1 - refroidissement	142
Figure 2-40 : écarts de température enregistrés au sein de P1 durant la cure thermique	142
Figure 2-41 : évolution de température au point M4 (0,27 m) en phase de chauffe – poutre P1	143
Figure 2-42 : écarts de température au point M4 (0,27 m) entre les poutres P2 et P1	143
Figure 2-43 : réponse thermique des poutres P2, P3 et P4 au point M4	144
Figure 2-44 : écarts de température entre les poutres P2, P3 et P4 au cours de la cure thermique	144
Figure 2-45 : protections contre la lixiviation testées (a. capuchon plastique ; b. textile de cure ; c. sac plastique)	145
Figure 2-46 : évaluation de la lixiviation des alcalins après cure thermique pour différents solutions de protection	145
Figure 2-47 : extensométrie à pointeaux (a. extensomètre, barre étalon et plots de mesure ; b. collage des plots ; c. mesure dimensionnelle sur carotte de béton)	147
Figure 2-48 : dispositifs pour essais de gonflement sous contraintes (a. bâti de fluage ; b. robot de mesure et éprouvette sans chargement axial ; c. robot en configuration de mesure)	148
Figure 2-49 : éprouvettes de gonflement sous contraintes (a. pose de la couche d'accroche ; b. traitement de surface ; c. pose des couches d'étanchéité et collage des embases métalliques)	149
Figure 2-50 : comparaison des suivis massiques des éprouvettes R1 conservées sous scellement aluminium intégral et sous scellement mixte aluminium/résine époxy	149
Figure 2-51 : dispositif de fixation des bases de mesure horizontale (a. vue générale après fixation sur une poutre ; b. illustration de la fixation ; c. plaque seule avec trous filetés pour réglage de position)	150
Figure 2-52 : instrumentation des poutres	151
Figure 2-53 : vue générale de P3 après instrumentation	151
Figure 2-54 : diagnostic du problème des capteurs à corde vibrante après cure thermique (a. récupération du capteur ; b. déplacement d'un aimant)	152
Figure 2-55 : jauge pain de sucre	153
Figure 2-56 : jauges d'extensométrie pour aciers	153
Figure 2-57 : exemple de données a. avant traitement b. après traitement	154
Figure 2-58 : repérage des zones ayant fait l'objet d'une extrapolation lors du traitement de données	155
Figure 2-59 : réacteurs à 100 % HR	156
Figure 2-60 : capteurs de température et d'humidité relative Sensirion (a. détail sur le mode de préparation ; b. série de capteur après fabrication [avec ou sans protection Gore-Tex])	157
Figure 2-61 : banc de pesée (a. pesée d'une poutre ; b. pesée de la poutre étalon)	158
Figure 2-62 : mesure de gammadensimétrie sur une poutre	158
Figure 2-63 : fabrication d'éprouvettes de gonflement libre et de caractérisation mécanique	161
Figure 2-64 : fabrication de poutres	162
Figure 2-65 : fabrication d'éprouvettes de gonflement sous contraintes	163
Figure 2-66 : réalisation expérimentale des traitements thermiques	164
Figure 2-67 : réponse thermique des poutres au point M4 (0,27 m)	165
Figure 2-68 : réponse thermique des poutres au point M4 (0,27 m) – chauffe	165
Figure 2-69 : réponse thermique des poutres au point M4 (0,27 m) – palier de température	165
Figure 2-70 : réponse thermique des poutres au point M4 (0,27 m) – refroidissement	166
Figure 2-71 : profils d'énergie de traitement thermique des différentes poutres	166
Figure 2-72 : profils de potentiel de gonflement dans les poutres estimé par le modèle de (Baghdadi et al. 2008-b) (a. Poutre P1 ; b. Poutres P2 à P5)	167
Figure 2-73 : synthèse des essais de caractérisation de la lixiviation des alcalins en phase de cure	168
Figure 3-1 : description du modèle de gonflement libre RSI	174
Figure 3-2 : influence des paramètres ϕ (a.) et δ (b.) sur la modélisation des gonflements libres	174
Figure 3-3 : fissuration d'une éprouvette de gonflement libre R1 après 450 jours de conservation en eau	175
Figure 3-4 : suivis dimensionnels et massiques – éprouvettes R1 – conservation en eau et à 100 % HR	176
Figure 3-5 : évolution des déformations en fonction de la prise de masse – éprouvettes R1 – conservation en eau et à 100 % HR	177
Figure 3-6 : suivis dimensionnels et massiques – éprouvettes R1 – conservation à 30 % HR	178
Figure 3-7 : modélisation du profil de séchage dans des éprouvettes conservées à 30 % HR	179
Figure 3-8 : profil de séchage des éprouvettes R1 – conservation à 30 % HR	180
Figure 3-9 : suivis dimensionnels et massiques – éprouvettes R1 – conservation sous scellement	180
Figure 3-10 : modélisation du profil de séchage dans des éprouvettes conservées sous scellement aluminium	181
Figure 3-11 : profil de séchage des éprouvettes R1 – conservation sous scellement	182
Figure 3-12 : comparaison des suivis dimensionnels et massiques des éprouvettes R1 et R2 – conservation en eau	185
Figure 3-13 : évolution des déformations en fonction de la prise de masse – éprouvettes R1 et R2 – conservation en eau	186
Figure 3-14 : comparaison des suivis dimensionnels et massiques des éprouvettes R2 – conservation en eau et à 100 % HR	187

Figure 3-15 : fissuration d'une éprouvette de gonflement libre R2 après 400 jours de conservation à 100 % HR	187
Figure 3-16 : évolution des déformations en fonction de la prise de masse – éprouvettes R1 et R2 – conservation à 100 % HR	188
Figure 3-17 : mécanisme de couplage RSI-RAG proposé	189
Figure 3-18 : comparaison des modèles de gonflement libre de (Brunetaud 2005) et (Larive 1998) appliqués au suivi dimensionnel des corps d'épreuve R2_H100-H30_GL_28	190
Figure 3-19 : corrélation du modèle proposé avec les données expérimentales et importance relative des contributions RSI et RAG	191
Figure 3-20 : comparaison de la fraction RSI du modèle de gonflement libre des éprouvettes R2_H100-H30_GL_28 au comportement réel de la formule R1 conservée en eau et à 100 % HR	192
Figure 3-21 : suivis dimensionnels et massiques – éprouvettes R3 – conservation en eau	193
Figure 3-22 : fissuration des éprouvettes R2_GLA après 130 jours d'exposition	194
Figure 3-23 : comparaison des suivis dimensionnels et massiques des éprouvettes R2_I-H30_GL_28, R3_I-H30_GL_28 et R2_I_GLA_28	195
Figure 3-24 : évolution des déformations en fonction de la prise de masse – éprouvettes R2_I-H30_GL_28, R2_I-H30_GL_28 et R2_I_GLA_28	196
Figure 3-25 : comparaison des suivis dimensionnels et massiques et confrontation à la teneur en alcalins – formules R1 et R2 – conservation en eau et à 100 % HR	198
Figure 3-26 : expansion développée par la formule R2 durant la cure thermique suivant la loi de coulage de (Ulm et al. 2000) (a. calcul du gonflement ; b. évolution des temps de latence et caractéristique)	200
Figure 3-27 : observations microscopiques des matériaux avant exposition à l'humidité (28 jours)	201
Figure 3-28 : observations microscopiques des matériaux à l'issue de la phase 1 du mécanisme (~ 60 j)	202
Figure 3-29 : observations microscopiques des matériaux à l'issue de la phase 2 du mécanisme (~ 300 j)	203
Figure 3-30 : détection de la présence de gels silico-alcalins par fluorescence des ions uranyles	204
Figure 3-31 : suivis dimensionnels et massique des éprouvettes R2 – conservation sous scellement et à 30 % HR	205
Figure 3-32 : comparaison des profils de séchage des éprouvettes R1 et R2 conservées à 30 % HR	206
Figure 3-33 : comparaison des profils de séchage des éprouvettes R1 et R2 conservées sous scellement	206
Figure 3-34 : suivis dimensionnels et massiques des éprouvettes R2 – conservation en eau et à 100 % HR – température de stockage de 20°C et 38°C	207
Figure 3-35 : comparaison des suivis dimensionnels et massiques et confrontation à la teneur en alcalins – formule R2 – conservation en eau et à 100 % HR – température de conservation de 20°C et 38°C	208
Figure 3-36 : évolution des déformations en fonction de la prise de masse – éprouvettes R2 – conservation en eau – températures de stockage de 20°C et 38°C	209
Figure 3-37 : évolution des déformations en fonction de la prise de masse – éprouvettes R2 – conservation à 100 % HR – températures de stockage de 20°C et 38°C	210
Figure 3-38 : suivis dimensionnels et massiques – éprouvettes NR – conservation en eau et à 100 % HR	213
Figure 3-39 : évolution des déformations en fonction de la prise de masse – éprouvettes NR et R1 – conservation en eau et à 100 % HR	213
Figure 3-40 : comparaison des profils de séchage calculés des éprouvettes NR, R1 et R2 conservées sous scellement	214
Figure 3-41 : comparaison des suivis dimensionnels et massiques des éprouvettes NR, R1 et R2 – conservation sous scellement aluminium	215
Figure 3-42 : comparaison des profils de séchage des éprouvettes NR, R1 et R2 conservées à 30 % HR	215
Figure 3-43 : comparaison des suivis dimensionnels et massiques des éprouvettes NR, R1 et R2 – conservation à 30 % HR	216
Figure 3-44 : comparaison des suivis dimensionnels et massiques des éprouvettes BT, NR et des éprouvettes non réactives de (Multon 2004) – conservation en eau	218
Figure 3-45 : comparaison des suivis dimensionnels et massiques des éprouvettes BT, NR et des éprouvettes non réactives de (Multon 2004) – conservation à 30 % HR	219
Figure 3-46 : comparaison des profils de séchage des éprouvettes NR et BT conservées à 30 % HR	219
Figure 3-47 : déformation de retrait mesurée en fonction de la variation relative de masse d'une couronne de béton de 2 cm d'épaisseur – formule R1 et béton réactif de l'étude (Multon 2004)	221
Figure 3-48 : déformation de retrait mesurée en fonction de la variation relative de masse d'une couronne de béton de 2 cm d'épaisseur	222
Figure 3-49 : suivi des déformations en fonction des variations relatives de masse – éprouvettes immergées	223
Figure 3-50 : suivi des déformations en fonction des variations relatives de masse – éprouvettes immergées (zoom)	224
Figure 3-51 : suivi des déformations en fonction des variations relatives de masse – éprouvettes conservées à 100 % HR	224
Figure 3-52 : suivi des déformations en fonction des variations relatives de masse – éprouvettes conservées à 100 % HR (zoom)	224
Figure 3-53 : exemple d'application numérique de la relation entre volume de l'espace poreux et rapport déformation/variation de masse – formule R1	227
Figure 3-54 : évaluation de la variation de volume des vides lors de la phase de gonflement intense	227
Figure 3-55 : forme générale de l'évolution comparée des estimations de gonflement volumique	229
Figure 3-56 : confrontation des estimations de gonflement volumique à partir des gonflements axiaux et des prises de masse	231
Figure 3-57 : adaptation du modèle de (Brunetaud 2005) à la description des essais d'expansion résiduelle	233
Figure 3-58 : comparaison des gonflements sur éprouvettes carottées à 28 jours et à 90 jours – formule NR – conservation en eau (a.) et à 100 % HR (b.)	233
Figure 3-59 : comparaison des gonflements sur éprouvettes carottées à 28 jours et à 90 jours – formule R1 – conservation en eau (a.) et à 100 % HR (b.)	234
Figure 3-60 : comparaison des gonflements sur éprouvettes carottées à 28 jours et à 90 jours – formule R2 – conservation en eau (a.) et à 100 % HR (b.)	234
Figure 3-61 : comparaison des suivis dimensionnels et massiques des éprouvettes moulées et carottées – conservation en eau	237
Figure 3-62 : suivi des déformations en fonction des variations relatives de masse – éprouvettes immergées	238
Figure 3-63 : confrontation des estimations de gonflement volumique à partir des gonflements axiaux et des prises de masse – éprouvettes moulées et carottées	239
Figure 3-64 : comparaison des suivis dimensionnels et massique des éprouvettes moulées pour caractérisation mécanique et pour quantification de la lixiviation des alcalins – conservation en eau	240
Figure 3-65 : confrontation des estimations de gonflement volumique à partir des gonflements axiaux et des prises de masse – répétabilité de fabrication (a. formule R1 ; b. formule R2)	241
Figure 3-66 : suivis dimensionnels et massiques – éprouvettes R1 – séchage tardif à 30 % HR	242

Figure 3-67 : comparaison des déformations de retrait et des pertes de masse après 28 jours de cure sous aluminium et lors du séchage tardif	243
Figure 3-68 : déformation de retrait mesurée en fonction de la variation relative de masse d'une couronne de béton de 2 cm d'épaisseur – éprouvettes R1_I-H30_GL_28 et R1_HI100-H30_GL_28 – recalage à l'instant du séchage tardif	243
Figure 3-69 : déformation de retrait mesurée en fonction de la variation relative de masse normée d'une couronne de béton de 2 cm d'épaisseur – formule R1 – séchage à 30 % HR	244
Figure 3-70 : comparaison des suivis dimensionnels et massiques après recalage à l'instant de basculement des conditions d'exposition – formule R1 – carottage à 28 jours ou 90 jours	245
Figure 3-71 : déformation de retrait mesurée en fonction de la variation relative de masse normée d'une couronne de béton de 2 cm d'épaisseur – formule R1 – carottage à 28 jours et 90 jours	246
Figure 3-72 : suivis dimensionnels et massiques – éprouvettes R1 – humidification tardive (immersion)	248
Figure 3-73 : comparaison des gonflements pour différentes histoires hydriques – formule R1 – I-H30 : suivi dimensionnel initial ; S-I et H30-I : suivi dimensionnel recalé	248
Figure 3-74 : comparaison des gonflements pour différentes histoires hydriques – formule R1 (zoom)	248
Figure 3-75 : faciès de fissuration des éprouvettes R1 soumises à une humidification tardive (a. R1_S-I_GL_90_4 ; b. R1_H30-I_GL_90_4)	249
Figure 3-76 : confrontation des estimations de gonflement volumique à partir des gonflements axiaux et des prises de masse – éprouvettes immergées (a. vue générale ; b. zoom)	250
Figure 3-77 : couplage entre gonflement et degré de saturation – formule R1 (a. avant recalage du degré de saturation initial ; b. après recalage)	252
Figure 3-78 : comparaison des suivis dimensionnels des éprouvettes soumises à une humidification tardive – formule R1 – carottage à 28 jours et 90 jours	253
Figure 3-79 : suivis dimensionnels et massiques des éprouvettes de gonflement libre conservées initialement en eau (a.) ou à 100 % HR (b.) et soumises à un séchage tardif à 30 % HR	254
Figure 3-80 : confrontation des déformations de retrait et des pertes de masse des corps d'épreuve I-H30_GL_28 et H30-I_GL_28	255
Figure 3-81 : confrontation des déformations de retrait et des pertes de masse des corps d'épreuve H100-H30_GL_28 et H30-I_GL_28	255
Figure 3-82 : déformation de retrait mesurée en fonction de la variation relative de masse normée d'une couronne de béton de 2 cm d'épaisseur – carottage à 28 jours et 90 jours	257
Figure 3-83 : suivis dimensionnels et massiques consécutifs à une humidification tardive – conservation initiale sous scellement aluminium	258
Figure 3-84 : suivis dimensionnels et massiques consécutifs à une humidification tardive – formules NR, R1 et R2 – conservation initiale sous scellement aluminium	259
Figure 3-85 : suivis dimensionnels après recalage des éprouvettes de gonflement libre initialement protégées de la dessiccation	260
Figure 3-86 : suivis dimensionnels après recalage des éprouvettes de gonflement libre initialement soumises à un séchage à 30 % HR	260
Figure 3-87 : confrontation des estimations de gonflement volumique à partir des gonflements axiaux et des prises de masse – éprouvettes soumises à une humidification tardive (a. vue générale ; b. zoom)	262
Figure 3-88 : couplage entre gonflement et degré de saturation (a. NR ; b. R1 ; c. R2 ; d. R3)	263
Figure 3-89 : couplage entre gonflement et degré de saturation sans prise en compte des prises de masse par expansion – formule R3	264
Figure 3-90 : suivis dimensionnels après recalage des éprouvettes de gonflement libre initialement protégées de la dessiccation – carottage à 28 jours et 90 jours	265
Figure 3-91 : suivis dimensionnels après recalage des éprouvettes de gonflement libre initialement soumises à un séchage à 30 % HR – carottage à 28 jours et 90 jours	265
Figure 3-92 : suivis dimensionnels axiaux et radiaux des éprouvettes non chargées axialement (a. sans étreinte radiale ; b. avec étreinte radiale)	267
Figure 3-93 : suivi massique des éprouvettes R1_L0T_SC (a. variations relatives de masse ; b. degré de saturation)	267
Figure 3-94 : suivis dimensionnels axiaux et radiaux des éprouvettes chargées axialement (a. sans étreinte radiale ; b. avec étreinte radiale)	268
Figure 3-95 : suivis dimensionnels radiaux (a.) et axiaux (b.) des éprouvettes chargées axialement et étreintes	269
Figure 3-96 : suivi des déformations axiales d'éprouvettes de gonflement sous contraintes (a. L0T0 ; b. L0T4 ; c. L15T0)	269
Figure 3-97 : valeurs relatives des paramètres de modélisation des gonflements libres par rapport au cas des éprouvettes conservées en eau	272
Figure 4-1 : suivi hydrique global des poutres durant la phase de séchage (a. vue d'ensemble ; b. zoom)	282
Figure 4-2 : suivi hydrique global des poutres durant la phase de remouillage (trait pointillé = instant de remouillage)	283
Figure 4-3 : suivi massique global des poutres après recalage à l'instant de remouillage	284
Figure 4-4 : évolution du séchage en fonction de la profondeur au sein de la poutre P1 (profondeur par rapport à la face supérieure du corps d'épreuve)	285
Figure 4-5 : évolution du profil de séchage au sein de la poutre P1	286
Figure 4-6 : comparaison des séchages mesurés à une profondeur de 10 mm sur les différentes poutres	286
Figure 4-7 : remontée capillaire du front d'imbibition dans la section transversale d'une poutre	288
Figure 4-8 : modélisation du suivi hydrique global de la poutre P1	289
Figure 4-9 : modélisation du comportement hydrique global de P2 par le modèle de (Multon 2004)	290
Figure 4-10 : contribution de l'imbibition aux variations massiques de P2 et représentation mathématique	291
Figure 4-11 : modélisation du comportement hydrique de P2 pour une cinétique de remontée capillaire sigmoïde	292
Figure 4-12 : représentation du front de remontée capillaire par la face inférieure de la poutre (section transversale)	294
Figure 4-13 : modélisation des évolutions massiques de P2 pour une cinétique de remontée capillaire sigmoïde et un comportement hydrique binaire du matériau	294
Figure 4-14 : comparaison des suivis hydriques globaux expérimentaux et modélisés (intégration du profil hydrique obtenu à l'aide du modèle hydrique binaire)	295
Figure 4-15 : évolution des profondeurs de front d'imbibition dans les différentes poutres (modèle hydrique binaire)	295
Figure 4-16 : comparaison des suivis hydriques globaux expérimentaux et modélisés (intégration du profil hydrique obtenu à l'aide du modèle hydrique de gonflement libre pondéré)	297
Figure 4-17 : évolution des profondeurs de front d'imbibition dans les différentes poutres (modèle hydrique de gonflement libre pondéré)	297

Figure 4-18 : comparaison des différentes modélisations de l'imbibition	298
Figure 4-19 : suivi des déformations verticales locales de la poutre P2 et comparaison au suivi dimensionnel en gonflement libre (a. vue générale ; b. zoom)	301
Figure 4-20 : évolution comparée des profils hydrique (a.) (modèles « binaire » et « gonflement libre modifié ») et de déformation verticale (b.) de la poutre P2	301
Figure 4-21 : suivi des déformations verticales locales de la poutre P2 par extensomètres à cordes vibrantes (a. suivi temporel ; b. profils de déformation)	303
Figure 4-22 : suivi des déformations transversales locales de la poutre P2 et comparaison au suivi dimensionnel en gonflement libre (a. vue générale ; b. zoom)	304
Figure 4-23 : évolution des déformations transversales en face inférieure et comparaison aux déformations internes à 0,37 de profondeur – poutre P2	304
Figure 4-24 : fissuration en face inférieure de la poutre P2 (a. about Nord ; b. about Sud)	305
Figure 4-25 : cage d'armature pour renforcement des zones d'appui des poutres non armées mise en place dans le coffrage avant coulage	305
Figure 4-26 : évolution des déformations transversales en face supérieure – poutre P2	306
Figure 4-27 : suivi des déformations transversales locales de la poutre P2 par extensomètres à corde vibrante et comparaison au suivi dimensionnel en gonflement libre (a. vue générale ; b. zoom)	306
Figure 4-28 : évolution comparée des profils hydrique (a.) (modèles « binaire » et « gonflement libre modifié ») et de déformation transversale (b.) de la poutre P2	307
Figure 4-29 : suivi des déformations longitudinales locales de la poutre P2 et comparaison au suivi dimensionnel en gonflement libre (a. vue générale ; b. zoom)	308
Figure 4-30 : évolution comparée des profils hydrique (a.) (modèles « binaire » et « gonflement libre modifié ») et de déformation longitudinale (b.) de la poutre P2	308
Figure 4-31 : estimation de la déformation longitudinale au niveau de la face supérieure de P2	308
Figure 4-32 : suivi des déformations longitudinales locales de la poutre P2 à l'aide d'extensomètres à corde vibrante (a. suivi temporel ; b. profils de déformation)	309
Figure 4-33 : suivi des déformations longitudinales globales de la poutre P2 et comparaison aux estimations issues des mesures par jauge noyée	310
Figure 4-34 : rotation d'une section située à 0,4 m de l'about Nord de P2 après 329 jours de suivi	310
Figure 4-35 : suivi des flèches de la poutre P2	311
Figure 4-36 : évolution des conditions d'appui des poutres (a. vue générale d'un appui ; b. configuration normale ; c. appuis en contact sous l'effet des gonflements)	311
Figure 4-37 : confrontation des flèches à mi-portée mesurées et calculées (a. vue générale ; b. zoom ; c. coefficient de corrélation des données considérées) – poutre P2	312
Figure 4-38 : profil de déformation longitudinale moyen (a.) et confrontation aux mesures de flèche (b.) – poutre P2	313
Figure 4-39 : déformations locales à une profondeur de 0,37 m – poutre P2	314
Figure 4-40 : déformations locales à une profondeur de 0,08 m – poutre P2	314
Figure 4-41 : fissuration de la poutre P2	315
Figure 4-42 : suivi des déformations verticales locales – poutre P1	316
Figure 4-43 : suivi des déformations transversales locales – poutre P1	317
Figure 4-44 : suivi des déformations horizontales locales – poutre P1	317
Figure 4-45 : évolution des profils hydrique (modèles « binaire » et « gonflement libre pondéré ») de la poutre P1	318
Figure 4-46 : suivi des déformations longitudinales globales de la poutre P1	319
Figure 4-47 : suivi des flèches de la poutre P1	319
Figure 4-48 : confrontation des flèches à mi-portée mesurées et calculées (a.) et coefficient de corrélation (b.) – poutre P1	320
Figure 4-49 : profil de déformation longitudinale moyen – poutre P1	320
Figure 4-50 : suivi des déformations verticales locales de la poutre P5 et comparaison au suivi dimensionnel en gonflement libre (a. vue générale ; b. zoom)	321
Figure 4-51 : évolution comparée des profils hydrique (a.) (modèles « binaire » et « gonflement libre modifié ») et de déformation verticale (b.) de la poutre P2	322
Figure 4-52 : suivi des déformations transversales locales de la poutre P5 et comparaison au suivi dimensionnel en gonflement libre (a. vue générale ; b. zoom)	323
Figure 4-53 : évolution comparée des profils hydrique (a.) (modèles « binaire » et « gonflement libre modifié ») et de déformation transversale (b.) de la poutre P5	323
Figure 4-54 : suivi des déformations longitudinales locales de la poutre P5 et comparaison au suivi dimensionnel en gonflement libre (a. vue générale ; b. zoom)	324
Figure 4-55 : évolution comparée des profils hydrique (a.) (modèles « binaire » et « gonflement libre modifié ») et de déformation longitudinale (b.) de la poutre P5	324
Figure 4-56 : suivi des déformations longitudinales globales de la poutre P5	325
Figure 4-57 : suivi des flèches de la poutre P5	325
Figure 4-58 : confrontation des flèches à mi-portée mesurées et calculées (a. vue générale ; b. zoom ; c. coefficient de corrélation des données considérées) – poutre P5	326
Figure 4-59 : profil de déformation longitudinale moyen (a.) et confrontation aux mesures de flèche (b.) – poutre P5	327
Figure 4-60 : comparaison des déformations locales dans les trois directions de l'espace à une profondeur de 0,37 m – poutre P5	328
Figure 4-61 : fissuration de la poutre P5 (partie 1)	328
Figure 4-62 : fissuration de la poutre P5 (partie 2)	329
Figure 4-63 : poutres non armées après rupture	330
Figure 4-64 : extraction d'une carotte de 60 mm de la poutre P2	330
Figure 4-65 : plan de carottage de la poutre P2	331
Figure 4-66 : plan de carottage de la poutre P5	331
Figure 4-67 : nomenclature des cylindres pour essais d'expansion résiduelle des poutres P2 et P5	332
Figure 4-68 : suivis dimensionnels et massiques des cylindres d'expansion résiduelle – poutres P2 et P5	332
Figure 4-69 : courbes de gonflement reconstituées à partir des essais d'expansion résiduelle (a. poutre P2 ; b. poutre P5)	333
Figure 4-70 : gradient de potentiel d'expansion résiduelle des poutres P2 et P5	335
Figure 4-71 : carottes de 60 mm extraites des poutres P2 (a.) et P5 (b.) pour observations microscopiques (profondeur croissante de gauche à droite)	336

Figure 4-72 : vue de détail des carottes de 60 mm	337
Figure 4-73 : observations microscopiques des prélèvements effectués sur P2	338
Figure 4-74 : observations microscopiques des prélèvements effectués sur P5	338
Figure 4-75 : comparaison des flèches à mi-portée des poutres non armées (a. vue générale ; zoom)	339
Figure 4-76 : identification du profil de déformations imposées	342
Figure 4-77 : comparaison de la flèche mesurée et de la flèche calculée de la poutre non réactive de l'étude (Multon 2004)	344
Figure 4-78 : modélisation du comportement de P1 à l'aide du modèle (Multon 2004)	344
Figure 4-79 : modélisation du comportement de P1 – modèle n°1	345
Figure 4-80 : modélisation du comportement de P1 – modèle n°2	346
Figure 4-81 : modélisation du comportement de P1 – modèle n°3	347
Figure 4-82 : diminution du module dynamique lors du développement de gonflements d'après (Brunetaud 2005)	348
Figure 4-83 : influence d'une variation du module d'Young – comparaison des estimations des modèles n°2 et n°4 – poutre P1	350
Figure 4-84 : influence d'une variation du module d'Young – comparaison des estimations des modèles n°3 et n°5 – poutre P1	350
Figure 4-85 : comparaison des estimations des modèles n°1, 2 et 3 appliqués à P2 (a. flèches ; b. déformation moyenne)	351
Figure 4-86 : influence d'une variation du module d'Young – comparaison des estimations des modèles n°2 et n°4 – poutre P2	352
Figure 4-87 : évaluation des déformations de la poutre P2 – modèle n°4 (a. déformation moyenne ; b. confrontation aux mesures par jauges noyées – $e(x)$ = déformation calculée à la profondeur x)	352
Figure 4-88 : évolution de l'ouverture d'une fissure transversale en face inférieure (a. 280 jours ; b. 320 jours)	352
Figure 4-89 : influence d'une variation du module d'Young – comparaison des estimations des modèles n°3 et n°5 – poutre P2	353
Figure 4-90 : évaluation des déformations de la poutre P2 – modèle n°5 (a. déformation moyenne ; b. confrontation aux mesures par jauges noyées – $e(x)$ = déformation calculée à la profondeur x)	353
Figure 4-91 : estimation des flèches de P5 par le modèle n°4	354
Figure 4-92 : évaluation des déformations de la poutre P5 – modèle n°4 (a. déformation moyenne ; b. confrontation aux mesures par jauges noyées – $e(x)$ = déformation calculée à la profondeur x)	355
Figure 4-93 : suivi des déformations verticales locales des poutres armées réactives vis-à-vis de la RSI (a. P3 ; b. P4)	357
Figure 4-94 : évolution comparée des profils hydriques et de déformations verticales des poutres armées réactives vis-à-vis de la RSI	358
Figure 4-95 : comparaison des déformations verticales locales des poutres atteintes de RSI à différentes profondeurs (a. 0,08 m ; b. 0,37 m)	358
Figure 4-96 : représentation simplifiée des essais de traction sur armatures	359
Figure 4-97 : suivi des déformations transversales locales des poutres armées réactives vis-à-vis de la RSI (a. P3 ; b. P4)	360
Figure 4-98 : évolution comparée des profils hydriques et des déformations transversales des poutres armées réactives vis-à-vis de la RSI	360
Figure 4-99 : comparaison des déformations transversales locales des poutres atteintes de RSI à différentes profondeurs (a. 0,08 m ; b. 0,27 m ; c. 0,37 m)	361
Figure 4-100 : suivi des déformations longitudinales locales des poutres armées réactives vis-à-vis de la RSI (a. P3 ; b. P4)	362
Figure 4-101 : comparaison des déformations longitudinales locales des poutres atteintes de RSI à différentes profondeurs (a. 0,08 m ; b. 0,17 m ; c. 0,27 m ; d. 0,37 m)	363
Figure 4-102 : évolution comparée des profils hydriques et de déformations longitudinales des poutres armées réactives vis-à-vis de la RSI	364
Figure 4-103 : suivi des déformations longitudinales globales des poutres armées réactives vis-à-vis de la RSI (a. P3 ; b. P4)	364
Figure 4-104 : déformation des armatures longitudinales inférieures (ALI) de la poutre P3 et confrontation aux estimations obtenues à partir des profils de déformations longitudinales	366
Figure 4-105 : déformation des armatures longitudinales inférieures (ALI – a.) et supérieures (ALS – b.) de la poutre P4 et confrontation aux estimations obtenues à partir des profils de déformations longitudinales	366
Figure 4-106 : suivi des flèches de la poutre P3	367
Figure 4-107 : suivi des flèches de la poutre P4	367
Figure 4-108 : comparaison des flèches des poutres P2, P3 et P4	368
Figure 4-109 : confrontation des flèches à mi-portée mesurées et calculées – poutres P3 et P4	368
Figure 4-110 : profil de déformation longitudinale moyen (a.) et confrontation aux mesures de flèches (b.) – poutre P3	370
Figure 4-111 : profil de déformation longitudinale moyen (a.) et confrontation aux mesures de flèches (b.) – poutre P4	370
Figure 4-112 : déformations longitudinales moyennes des poutres fortement réactives vis-à-vis de la RSI	371
Figure 4-113 : fissuration de la poutre P3	372
Figure 4-114 : fissuration de la poutre P4	373
Figure 4-115 : suivi des déformations verticales locales de la poutre armée réactive vis-à-vis de la RSI et de la RAG	374
Figure 4-116 : évolution comparée des profils hydriques (a.) et de déformations verticales (b.) de la poutre armée réactive vis-à-vis de la RSI et de la RAG	374
Figure 4-117 : comparaison des déformations verticales locales des poutres atteintes de RSI et de RAG à différentes profondeurs (a. 0,08 m ; b. 0,37 m)	375
Figure 4-118 : suivi des déformations transversales locales de la poutre armée réactive vis-à-vis de la RSI et de la RAG	375
Figure 4-119 : évolution comparée des profils hydriques et de déformations transversales de la poutre armées réactive vis-à-vis de la RSI et de la RAG	376
Figure 4-120 : comparaison des déformations transversales locales des poutres atteintes de RSI et de RAG à différentes profondeurs (a. 0,08 m ; b. 0,27 m ; c. 0,37 m)	376
Figure 4-121 : suivi des déformations longitudinales locales de la poutre P6	377
Figure 4-122 : évolution comparée des profils hydriques (a.) et de déformations longitudinales (b.) – poutre P6	377
Figure 4-123 : comparaison des déformations longitudinales locales des poutres atteintes de RSI et de RAG à une profondeur de 0,37 m	378
Figure 4-124 : suivi des déformations longitudinales globales de la poutre P6	378
Figure 4-125 : déformation des armatures longitudinales inférieures (ALI – a.) et supérieures (ALS – b.) de la poutre P6 et confrontation aux estimations obtenues à partir des profils de déformations longitudinales	379
Figure 4-126 : suivi des flèches de la poutre P6	380
Figure 4-127 : comparaison des flèches des poutres P2 à P6	380
Figure 4-128 : confrontation des flèches à mi-portée mesurées et calculées (a. flèches ; b. coefficients de corrélation) – poutre P6	381
Figure 4-129 : profil de déformation horizontale moyen (a.) et confrontation aux mesures de flèche (b.) – poutre P6	381
Figure 4-130 : déformation longitudinale moyenne des poutres P5 et P6 – effets des armatures longitudinales	382
Figure 4-131 : déformation longitudinale moyenne des poutres P4 et P6 – effets de la réactivité du matériau	383

Figure 4-132 : fissuration de la poutre P6	383
Figure 4-133 : modélisation du comportement mécanique des poutres fortement armées – flèches à mi-portée – influence du coefficient réducteur α (a. poutre P4 ; b. poutre P6)	386
Figure 4-134 : modélisation du comportement mécanique de la poutre faiblement armée – flèches à mi-portée – influence du coefficient réducteur α	387
Figure 4-135 : modélisation du comportement mécanique des poutres fortement armées – flèches à mi-portée – influence du module d'Young (a. poutre P4 - $\alpha = 0,09$; b. poutre P6 - $\alpha = 0,05$)	388
Figure 4-136 : modélisation du comportement mécanique [$e(x) =$ déformation calculée à la profondeur x] des poutres fortement armées – déformations longitudinales – modèle n°4 (a. poutre P4 - $\alpha = 0,09$; b. poutre P6 - $\alpha = 0,05$)	388
Figure 4-137 : confrontation de la déformation moyenne calculée et expérimentale – modèles n°2 et 4 (a. poutre P4 ; b. poutre P6)	388
Figure 4-138 : fissuration des poutres fortement armées	389
Figure 4-139 : modélisation du comportement mécanique de la poutre faiblement armée – flèches à mi-portée – influence du module d'Young (poutre P3 - $\alpha = 0,7$)	390
Figure 4-140 : modélisation du comportement mécanique de la poutre faiblement armée – déformations longitudinales – modèle n°4 (poutre P3 - $\alpha = 0,7$) (a. déformation moyenne ; b. déformations locales – $e(x) =$ déformation calculée à la profondeur x)	390
Figure 4-141 : fissuration en face supérieure de P3 (a. 250 jours ; b. fissuration en faïençage à 427 j)	391
Figure 4-142 : modélisation du comportement mécanique des poutres fortement armées – flèche à mi-portée – influence de la modélisation hydrique (a. poutre P4 - $\alpha = 0,09$; b. poutre P6 - $\alpha = 0,05$)	392
Figure 4-143 : modélisation du comportement mécanique des poutres fortement armées – déformations longitudinales – modèle n°5 (a. poutre P4 - $\alpha = 0,09$; b. poutre P6 - $\alpha = 0,05$)	392
Figure 4-144 : confrontation de la déformation moyenne calculée et expérimentale – modèles n°4 et 5 (a. poutre P4 ; b. poutre P6)	392
Figure 4-145 : modélisation du comportement mécanique de la poutre faiblement armée – flèches à mi-portée – influence de la modélisation hydrique (poutre P3 - $\alpha = 0,7$)	393
Figure 4-146 : modélisation du comportement mécanique de la poutre faiblement armée – flèches à mi-portée – modèles n°4 et 5 (poutre P3 - $\alpha = 0,7$) (a. déformation moyenne ; b. déformations locales)	393
Figure 4-147 : organisation de la méthode de re-calcul développée par (Baghdadi 2008)	396
Figure 4-148 : retrait de dessiccation en fonction de l'humidité à l'équilibre pour des éprouvettes très fines (Granger 1996)	399
Figure 4-149 : exemple de courbe de sorption-désorption d'un béton ordinaire d'après (Baroghel-Bouny 1994)	401
Figure 4-150 : propriétés de transferts hydriques proposées par (Baghdadi 2008) (a. conductivité hydrique K ; b. coefficient d'emmagasinement C ; c. rapport K/C)	402
Figure 4-151 : comparaison des degrés de saturation expérimentaux et calculés pour les éprouvettes R1_H30-I_GL_28 (a. degré de saturation moyen ; b. degrés de saturation locaux à 5, 30 et 50 mm de l'axe du cylindre)	403
Figure 4-152 : maillage de la demi poutre ($l^*h^*L = 0,25^*0,50^*1,5 \text{ m}^3$)	403
Figure 4-153 : résultats du calcul hydrique n°1 – poutre P2 (a. profil de degré de saturation à différentes échéances ; b. variations massiques globales correspondantes)	404
Figure 4-154 : numérotation des groupes d'éléments pour le maillage de poutre	404
Figure 4-155 : résultats du calcul hydrique n°2 – poutre P2 (a. profil de degré de saturation à différentes échéances ; b. variations massiques globales correspondantes)	406
Figure 4-156 : fonctions de couplage gonflement / degré de saturation – poutre P2	407
Figure 4-157 : retrait mesuré et calculé à l'aide de la loi de (Baghdadi 2008)	407
Figure 4-158 : confrontation des résultats du calcul mécanique n°1 aux mesures de flèche à mi-portée – poutre P2 (a. vue d'ensemble ; b. zoom)	409
Figure 4-159 : confrontation des résultats du calcul mécanique n°2 aux mesures de flèche à mi-portée – poutre P2 (a. vue d'ensemble ; b. zoom)	409
Figure 4-160 : confrontation des résultats du calcul mécanique n°2 aux mesures de flèche à mi-portée après modification de la cinétique d'expansion – poutre P2 (a. vue d'ensemble ; b. zoom)	411
Figure 4-161 : déformation moyenne expérimentale et modélisée – poutre P2 (a. vue générale ; b. zoom)	411
Figure 4-162 : confrontation des résultats des calculs mécaniques aux données expérimentales – poutre P5 (a. flèche – vue d'ensemble ; b. flèche – zoom ; c. déformation moyenne)	413
Figure 4-163 : confrontation des résultats des calculs mécaniques aux mesures de flèche à mi-portée – poutre P1 (a. flèche – vue d'ensemble ; b. flèche – zoom ; c. déformation moyenne)	413
Figure 4-164 : architecture simplifiée du module de re-calcul RGIB prenant en compte l'influence des gonflements sur le comportement hydrique et l'influence des alcalins	415
Figure 4-165 : suivi des poutres P1, P3, P4 après remouillage (a. flèches à mi-portée ; b. déformation longitudinale globale à 0,23 m de profondeur)	416
Figure 4-166 : fissuration en face supérieure des poutres remouillées – réglet placé suivant l'axe longitudinal des poutres (a. P1 – 762 j ; b. P3 – 545 j ; c. P4 – 687 j)	417

Index des tableaux

Tableau 2-1 : conditions de conservation des éprouvettes de gonflement libre	102
Tableau 2-2 : conditions de conservation des éprouvettes de gonflement libre	103
Tableau 2-3 : Cas de chargement pour éprouvettes de gonflement sous contraintes	108
Tableau 2-4 : typologie des poutres testées	113
Tableau 2-5 : échéance de mise en eau des poutres	116
Tableau 2-6 : tableau récapitulatif de la nomenclature des corps d'épreuve ($n^{\circ}1$)	117
Tableau 2-7 : tableau récapitulatif de la nomenclature des corps d'épreuve ($n^{\circ}2$)	117
Tableau 2-8 : tableau récapitulatif de la nomenclature des corps d'épreuve ($n^{\circ}3$)	117
Tableau 2-9 : composition cimentaire en pourcentage massique selon la méthode de Bogue (analyses en provenance des cimentiers et analyses LCPC du lot de ciment utilisé pour l'étude)	120
Tableau 2-10 : formulation des bétons (kg/m^3)	121
Tableau 2-11 : caractérisation mécanique des matériaux à 28 jours (cure sous scellement hydrique)	122
Tableau 2-12 : caractérisation mécanique des matériaux à 28 jours (cure en eau)	122
Tableau 2-13 : coefficients de dilatation thermique des matériaux (gamme 20-38°C)	122
Tableau 2-14 : masse volumique des matériaux	123
Tableau 2-15 : composition chimique des ciments (méthode de Bogue – analyses LCPC)	127
Tableau 2-16 : chaleurs massiques d'hydratation des phases du ciment selon (Waller 2000)	127
Tableau 2-17 : dégagement de chaleur en conditions adiabatiques des bétons	128
Tableau 2-18 : capacités thermiques massiques des phases du ciment (Waller 2000)	128
Tableau 2-19 : capacités thermiques massiques des bétons ($\text{kJ}/\text{K}/\text{m}^3$)	129
Tableau 2-20 : évaluation des élévations de température en conditions adiabatiques (°C)	129
Tableau 2-21 : consigne de traitement thermique visée	130
Tableau 2-22 : caractéristiques des modèles TEXO	131
Tableau 2-23 : synthèse des essais sur béton frais	160
Tableau 2-24 : paramètres du modèle de (Baghdadi et al. 2008-b) pour différents bétons	164
Tableau 2-25 : évaluation des énergies de traitement thermique	164
Tableau 2-26 : énergies de traitement thermique au sein des différentes poutres	167
Tableau 2-27 : potentiel de gonflement dans les poutres estimé par le modèle (Baghdadi et al. 2008-b)	167
Tableau 3-1 : calage des paramètres du modèle de gonflement libre – éprouvettes R1 – conservation en eau et à 100 % HR	176
Tableau 3-2 : influence de la méthode de calage des paramètres de gonflement libre – éprouvettes R1 – conservation en eau	177
Tableau 3-3 : régression linéaire entre déformation et variations de masse – éprouvettes R1 – conservation en eau et à 100 % HR	177
Tableau 3-4 : calage des paramètres du modèle de gonflement libre – éprouvettes R1 et R2 – conservation en eau	185
Tableau 3-5 : régression linéaire entre déformation et variations de masse – éprouvettes R1 et R2 – conservation en eau	186
Tableau 3-6 : régression linéaire entre déformation et variations de masse – éprouvettes R1 et R2 – conservation à 100 % HR	188
Tableau 3-7 : calage des paramètres des lois de gonflement libre RSI et RAG	190
Tableau 3-8 : calage des paramètres du modèle de gonflement libre – éprouvettes R2 – conservation à 100 % HR	191
Tableau 3-9 : comparaison des paramètres de modélisation des comportements RSI pour les formules R1 et R2 conservées en eau ou à 100 % HR	191
Tableau 3-10 : comparaison des paramètres de modélisation des gonflements libres des corps d'épreuve R2_I-H30_GL_28, R3_I-H30_GL_28 et R2_I_GLA_28	193
Tableau 3-11 : régression linéaire entre déformation et variations de masse – éprouvettes R2_I-H30_GL_28, R2_I-H30_GL_28 et R2_I_GLA_28	196
Tableau 3-12 : comparaison des paramètres de modélisation des gonflement libre des éprouvettes R2 – conservation en eau et à 100 % HR – température de stockage 20°C et 38°C	208
Tableau 3-13 : régression linéaire entre déformation et variations de masse – éprouvettes R2 – conservation en eau et à 100 % HR – température de conservation de 20°C et 38°C	209
Tableau 3-14 : calage des paramètres du modèle de gonflement libre – éprouvettes NR – conservation en eau et à 100 % HR	212
Tableau 3-15 : régression linéaire entre déformation et variations de masse – éprouvettes NR et R1 – conservation en eau et à 100 % HR	214
Tableau 3-16 : régressions linéaires entre déformation de retrait et variation relative de masse d'une couronne de béton de 2 cm d'épaisseur (κ = coefficient de contraction hydrique)	222
Tableau 3-17 : régressions linéaires entre déformations et variations de masse – éprouvettes immergées et à 100 % HR	224
Tableau 3-18 : caractéristiques des produits et des réactifs de la conversion du monosulfate en ettringite	226
Tableau 3-19 : paramètres de régression linéaire des courbes de gonflement volumique en phase 2	232
Tableau 3-20 : calage des paramètres des modèles de gonflement libre pour les éprouvettes carottées à 28 jours et 90 jours	234
Tableau 3-21 : calage des paramètres des modèles de gonflement libre pour les éprouvettes carottées et moulées	238
Tableau 3-22 : régressions linéaires entre déformations et variations de masse – éprouvettes carottées et moulées – conservation en eau	238
Tableau 3-23 : calage des paramètres des modèles de gonflement libre pour les éprouvettes carottées et moulées	240
Tableau 3-24 : paramètres de régression linéaire des courbes de gonflement volumique – répétabilité de fabrication	241
Tableau 3-25 : paramètres de régression linéaire de la relation déformation / variation relative de masse normée – formule R1 – séchage à 30 % HR	245
Tableau 3-26 : paramètres de régression linéaire de la relation déformation / variation relative de masse – formule R1 – carottage à 28 jours ou 90 jours	246
Tableau 3-27 : calage des paramètres du modèle de gonflement libre – formule R1 – éprouvettes immergées	247
Tableau 3-28 : paramètres de régression linéaire des courbes de gonflement volumique – formule R1 – cas d'une humidification tardive	250
Tableau 3-29 : estimation des degrés de saturation initiaux des éprouvettes R1	252
Tableau 3-30 : calage des paramètres de la loi de gonflement libre pour les suivis dimensionnels recalés à 538 jours en fonction de l'échéance de carottage – formule R1 – éprouvettes immergées tardivement	253

Tableau 3-31 : paramètres de régression linéaire de la relation déformation / variation relative de masse– formule NR – carottage à 28 jours ou 90 jours	256
Tableau 3-32 : paramètres de régression linéaire de la relation déformation / variation relative de masse– formule R1 – carottage à 28 jours ou 90 jours	256
Tableau 3-33 : paramètres de régression linéaire de la relation déformation / variation relative de masse– formule R2 – carottage à 28 jours ou 90 jours	256
Tableau 3-34 : calage des paramètres de modélisation des gonflements libre – effets d'une humidification tardive	261
Tableau 3-35 : paramètres de régression linéaire des courbes de gonflement volumique – influence de l'histoire hydrique – partie 1	261
Tableau 3-36 : paramètres de régression linéaire des courbes de gonflement volumique – influence de l'histoire hydrique – partie 2	262
Tableau 3-37 : estimation des degrés de saturation initiaux – éprouvettes de gonflement libre	263
Tableau 3-38 : calage des paramètres de modélisation des gonflements libre dans le cas d'une humidification tardive– effets de l'échéance de carottage	266
Tableau 3-39 : synthèse des paramètres de modélisation des gonflements libres – éprouvettes carottées à 28 jours	271
Tableau 4-1 : nomenclature des poutres testées	281
Tableau 4-2 : calage des paramètres pour représentation des profils de séchage	285
Tableau 4-3 : paramètres de modélisation de la fraction d'imbibition pour la poutre P2	291
Tableau 4-4 : valeurs des différents paramètres du modèle de comportement hydrique binaire	296
Tableau 4-5 : valeurs des différents paramètres du modèle de comportement hydrique de gonflement libre pondéré par la cinétique d'imbibition	298
Tableau 4-6 : évolution de la courbure et de la déformation longitudinale moyenne de la poutre P2	313
Tableau 4-7 : évolution de la courbure et de la déformation longitudinale moyenne de la poutre P1	321
Tableau 4-8 : évolution de la courbure et de la déformation longitudinale moyenne de la poutre P5	327
Tableau 4-9 : calage des paramètres de la loi sigmoïde pour les éprouvettes de gonflement libre – poutre P2	333
Tableau 4-10 : calage des paramètres de la loi sigmoïde pour les éprouvettes de gonflement libre – poutre P5	334
Tableau 4-11 : évolution de la courbure et de la déformation longitudinale moyenne de la poutre P3	370
Tableau 4-12 : évolution de la courbure et de la déformation longitudinale moyenne de la poutre P4	370
Tableau 4-13 : évolution de la courbure et de la déformation longitudinale moyenne de la poutre P6	382
Tableau 4-14 : synthèse des paramètres pris en compte pour le calcul hydrique n°1	403
Tableau 4-15 : synthèse des paramètres pris en compte pour le calcul hydrique n°2	405
Tableau 4-16 : synthèse des paramètres d'entrée de la modélisation de la poutre P2	408
Tableau 4-17 : synthèse des paramètres d'entrée de la modélisation des poutres P1 et P5	412

Annexe 1 Expérimentations sur poutres : données et plans

A1	Ferraillage des poutres	461
A1.1	Plans de ferraillage.....	461
A1.2	Caractéristiques des armatures.....	462
A2	Plans d'instrumentation	463
A2.1	Plan d'instrumentation interne de la poutre P1	463
A2.2	Plan d'instrumentation interne des poutres P2 à P6	463
A2.3	Plan d'instrumentation externe des poutres P1 à P6	463
A2.4	Plans d'instrumentation des ferrailages.....	464
A2.5	Positionnement des sections de gammadensimétrie.....	465

A1 Ferrailage des poutres

A1.1 Plans de ferrailage

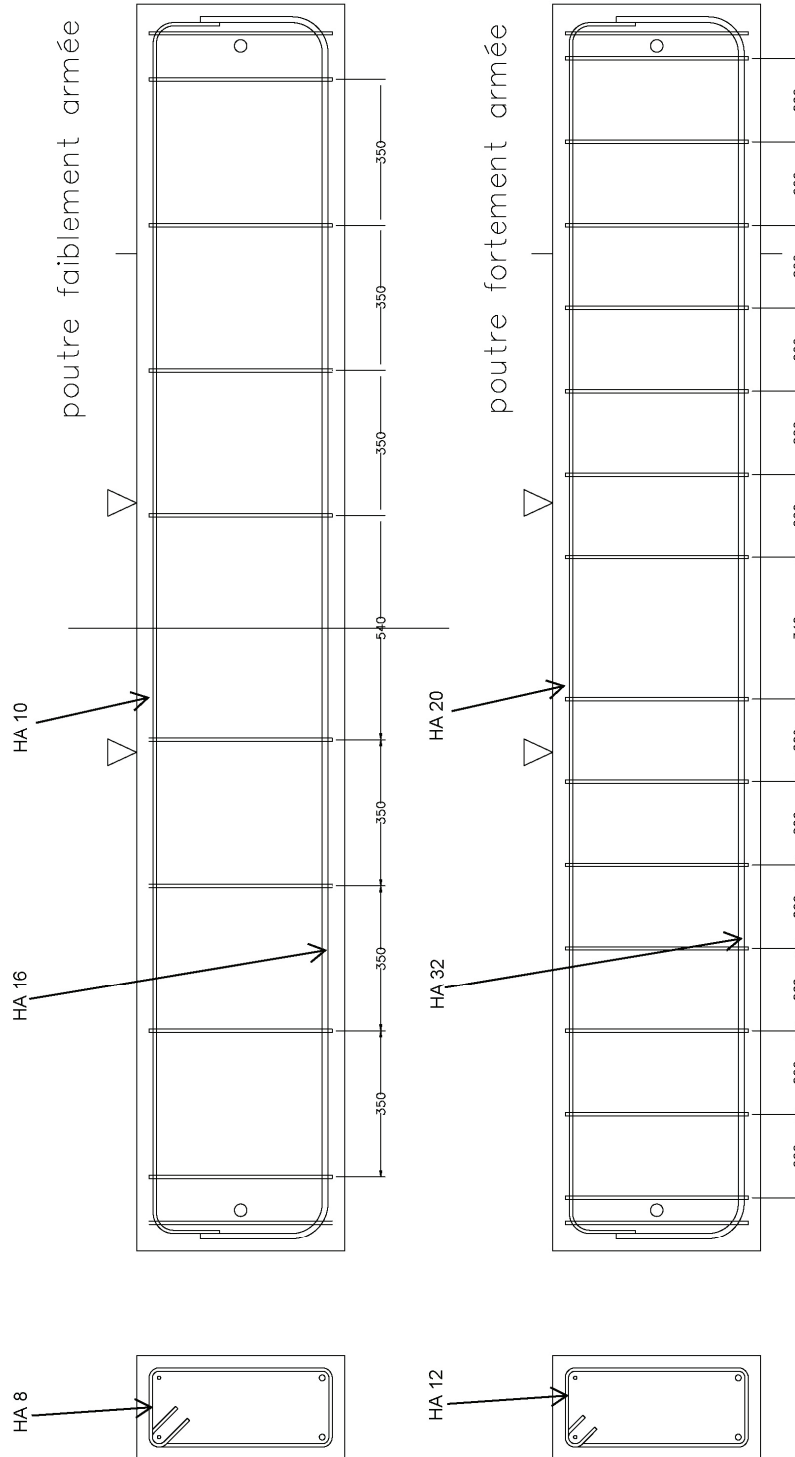


Figure A1. 1 : plans de ferrailage des poutres

A1.2 Caractéristiques des armatures

Des essais de caractérisation des performances mécaniques des armatures ont été réalisés. La figure et le tableau suivants synthétisent les résultats de ces essais.

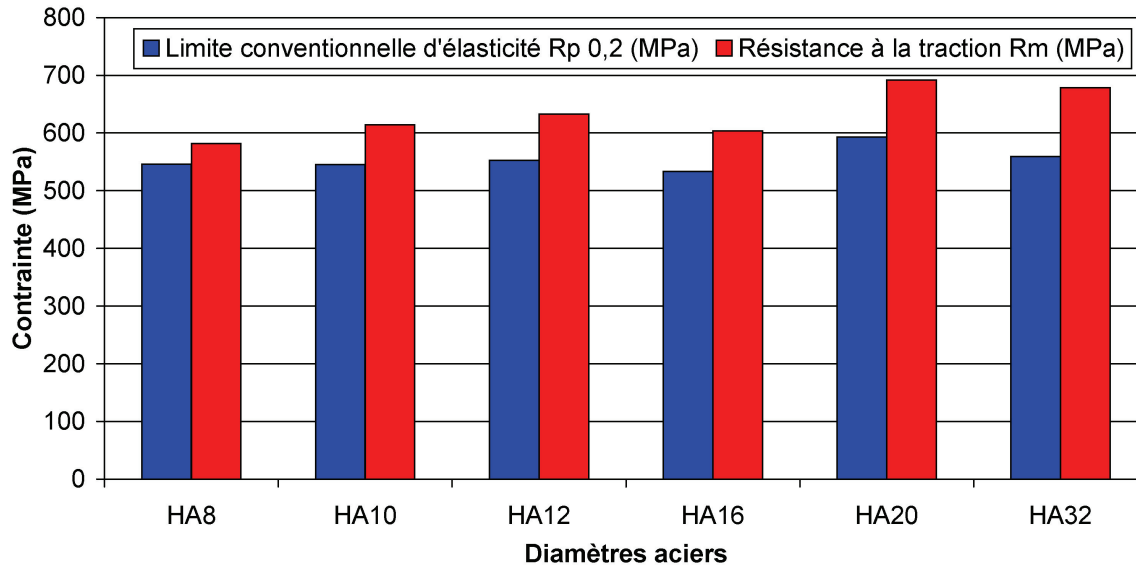


Figure A1.2 : essais de caractérisation des aciers

Type barre	n° échantillon	Limite conventionnelle d'élasticité Rp 0,2 (MPa)	Résistance à la traction Rm (MPa)	Rapport Rm/Rp0,2	Allongement
HA8	1	540	581	1,08	4,50%
HA8	2	552	582	1,05	3,60%
HA8	Moyenne	546	581,5	1,07	4,05%
HA10	1	546	627	1,15	5,50%
HA10	2	545	601	1,10	4,60%
HA10	Moyenne	545,5	614	1,13	5,05%
HA12	1	550	630	1,15	6,20%
HA12	2	555	635	1,14	6,30%
HA12	Moyenne	552,5	632,5	1,14	6,25%
HA16	1	535	606	1,13	5,80%
HA16	2	531	601	1,13	5,90%
HA16	Moyenne	533	603,5	1,13	5,85%
HA20	1	591	690	1,17	10,00%
HA20	2	595	694	1,17	9,20%
HA20	Moyenne	593	692	1,17	9,60%
HA32	1	563	680	1,21	8,60%
HA32	2	555	677	1,22	8,10%
HA32	Moyenne	559	678,5	1,21	8,35%

A2 Plans d'instrumentation

A2.1 Plan d'instrumentation interne de la poutre P1

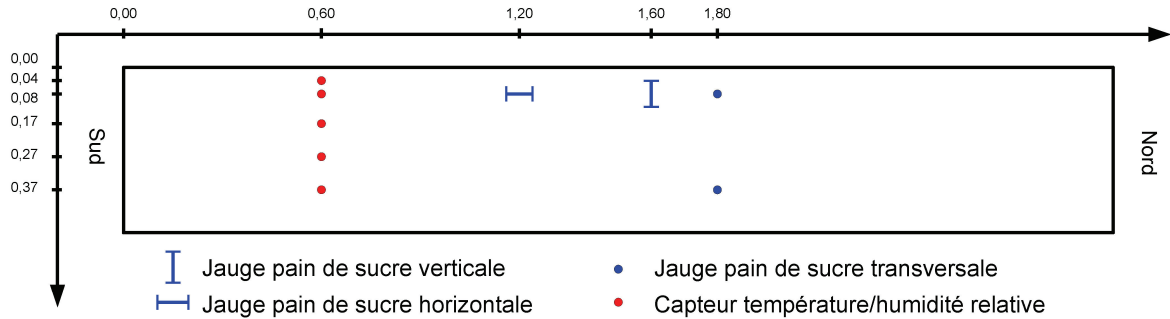


Figure A1. 3 : plan d'instrumentation interne de la poutre P1

A2.2 Plan d'instrumentation interne des poutres P2 à P6

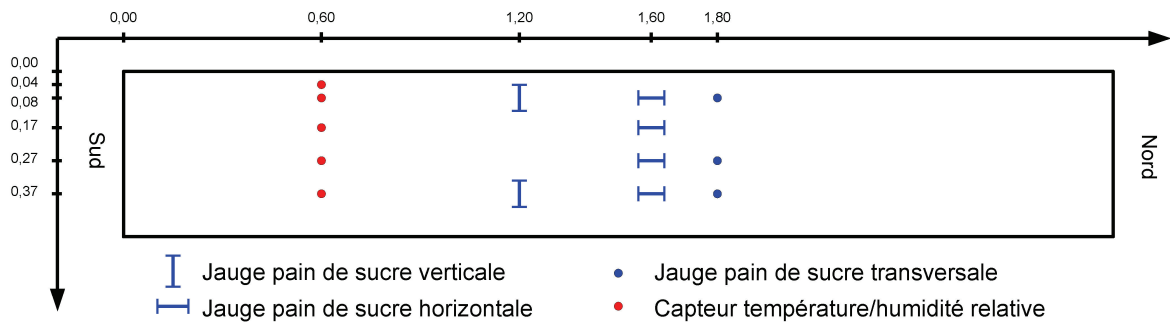


Figure A1. 4 : plan d'instrumentation interne des poutres P2 à P6

A2.3 Plan d'instrumentation externe des poutres P1 à P6

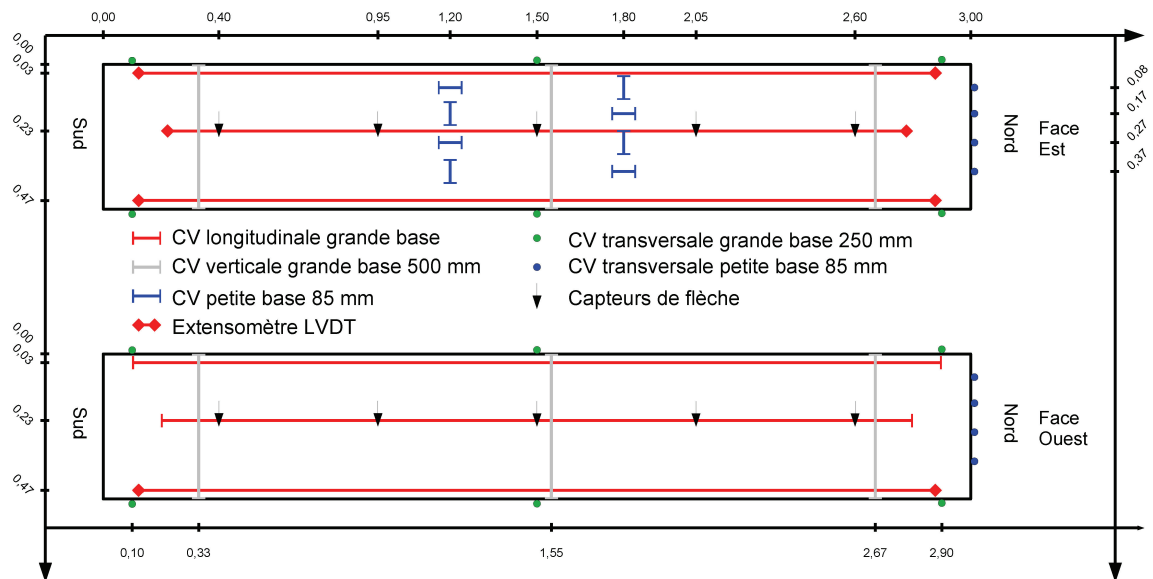


Figure A1. 5 : plan d'instrumentation externe des poutres

Les extensomètres longitudinaux positionnés aux cotes de 0,03 m et à 0,47 m ont une longueur de base de 2980 mm. Ceux positionnés à 0,23 m ont une longueur de base de 2640 mm.

A2.4 Plans d'instrumentation des ferrillages

Instrumentation des poutres faiblement armées (jauges soudées) :

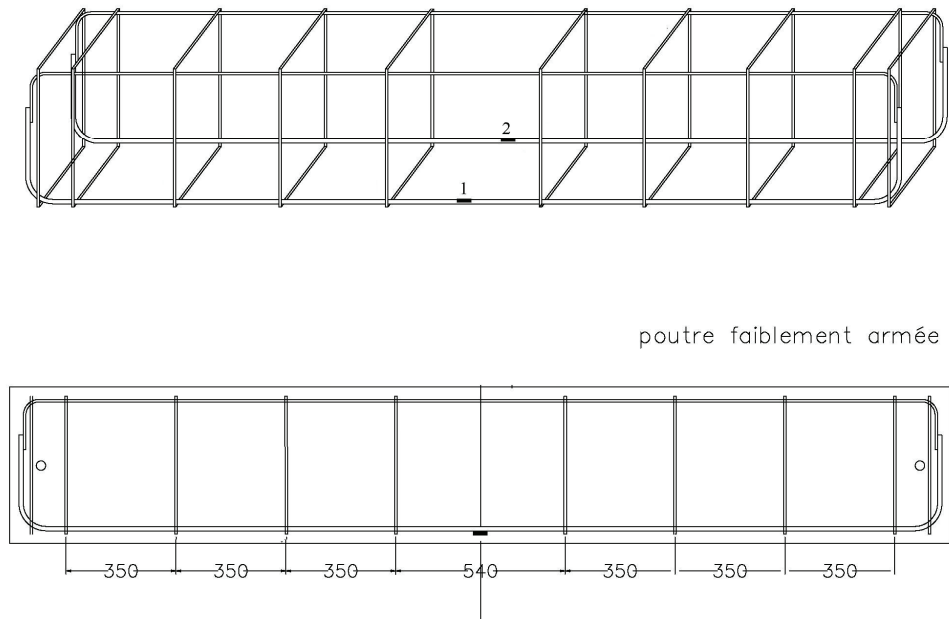


Figure A1. 6 : plan d'instrumentation du ferrillage A

Instrumentation des poutres fortement armées (jauges soudées) :

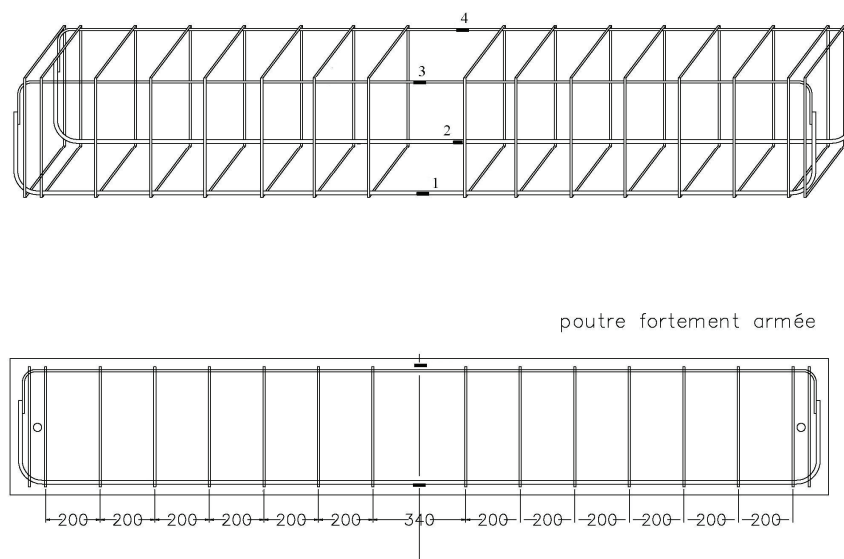


Figure A1. 7 : plan d'instrumentation du ferrillage FA

A2.5 Positionnement des sections de gammadensimétrie

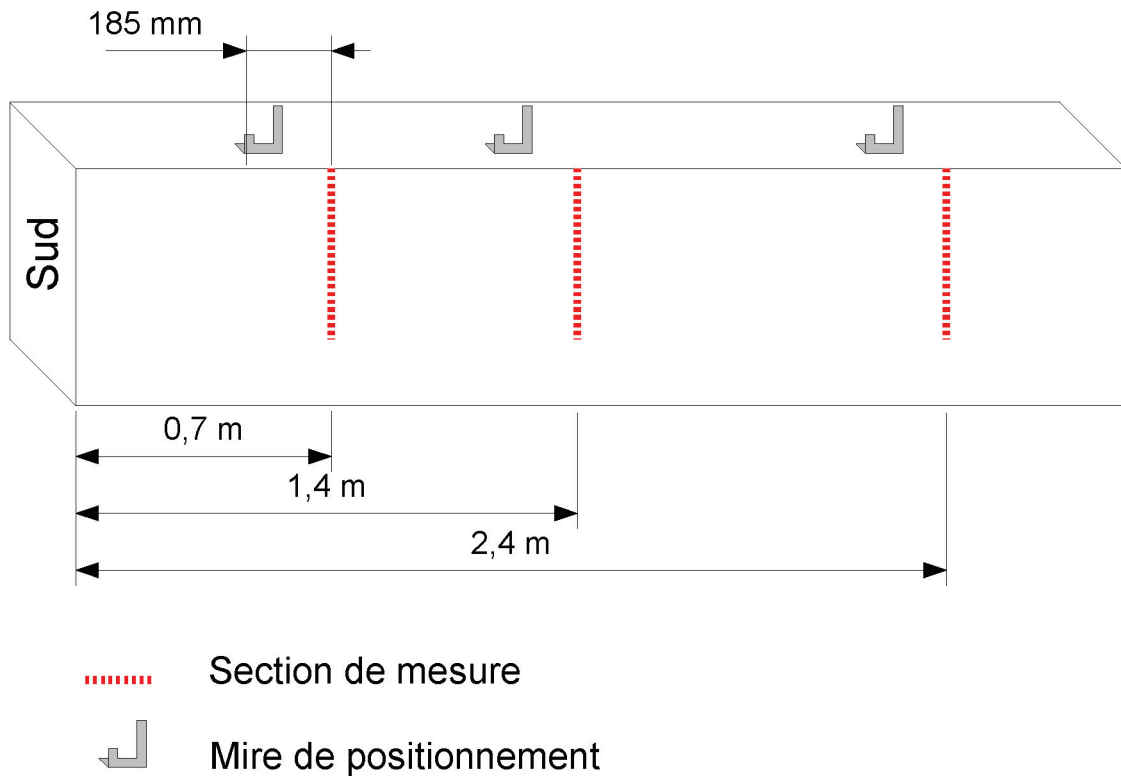


Figure A1. 8 : position des sections de gammadensimétrie

Annexe 2 Formulation des bétons

A1	Compositions cimentaires	469
A2	Granulométrie des granulats	470
A3	Formulation des bétons	470
A3.1	Pré-formulation par méthode de Dreux-Gorisse et optimisation du squelette granulaire	470
A3.2	Ajustements expérimentaux	471
A3.2.1	Essais de convenance	471
A3.2.2	Dépendance au malaxage	472
A3.3	Procédure de malaxage	473
A3.4	Mise en œuvre	473

A1 Compositions cimentaires

Le tableau ci-dessous donne la composition chimique détaillée des ciments mis en oeuvre dans cette étude (pourcentages massiques). Il confronte les analyses fournies par la fiche technique du cimentier et celles issues des essais réalisés par le LCPC sur des échantillons prélevés dans les ciments approvisionnés. Les écarts entre les différentes analyses peuvent s'expliquer par la variabilité des caractéristiques des ciments produits au cours du temps (analyses cimentier et analyses LCPC réalisées sur des lots différents).

	CIMENT_NR		CIMENT_R	
	Cimentier	LCPC	Cimentier	LCPC
SiO₂	21,39	22,59	19,70	20,38
Al₂O₃	3,66	3,33	5,20	4,30
TiO₂	-	0,14	-	0,24
Fe₂O₃	4,25	3,83	4,20	3,80
CaO	64,58	64,39	63,20	62,79
MgO	0,96	0,92	1,40	1,25
Na₂O	0,10	0,24	0,13	0,35
K₂O	0,28	0,31	0,78	0,73
SO₃	2,63	2,61	3,50	3,46
Cl	0,02	0,00	0,05	0,04
S	0,01	Traces	0,04	Traces
MnO	0,13	0,08	-	0,05
PAF	0,92	0,45	1,20	2,04
Insolubles	0,09	1,06	0,40	0,54
Na₂O_{eq}	0,28	0,44	0,63	0,83
CaO libre	-	0,83	-	1,39
CO₂	-	1,67	-	1,84

On rappelle pour mémoire les notations des cimentiers pour les différents éléments dosés :

C	S	A	F	H	S	C	K	N
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	H ₂ O	SO ₃	CO ₂	K ₂ O	Na ₂ O

A2 Granulométrie des granulats

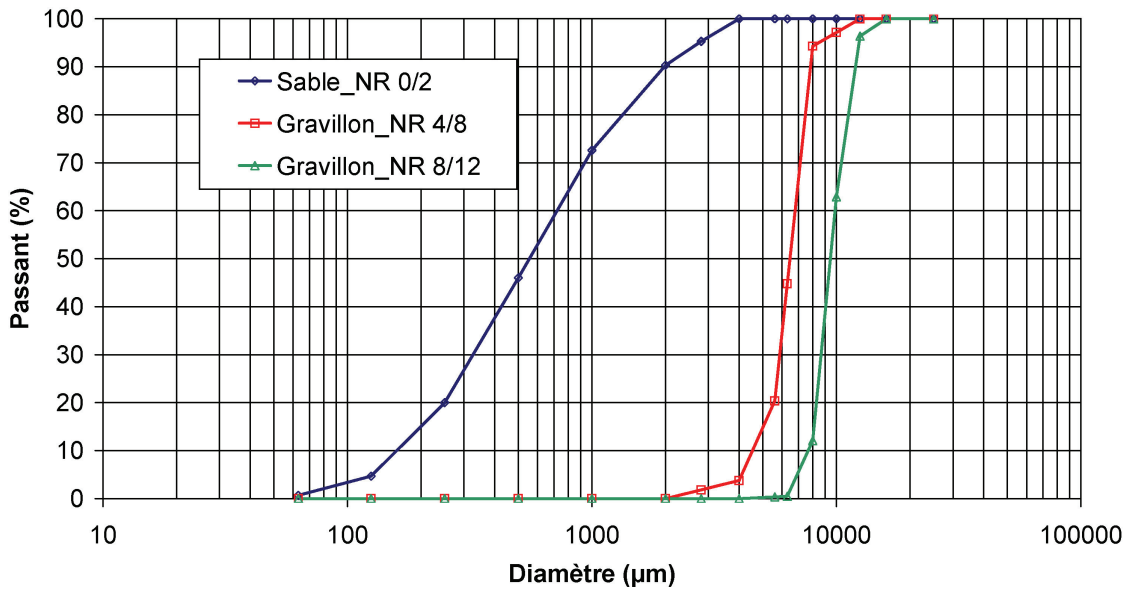


Figure A2. 1 : granulométrie des granulats NR

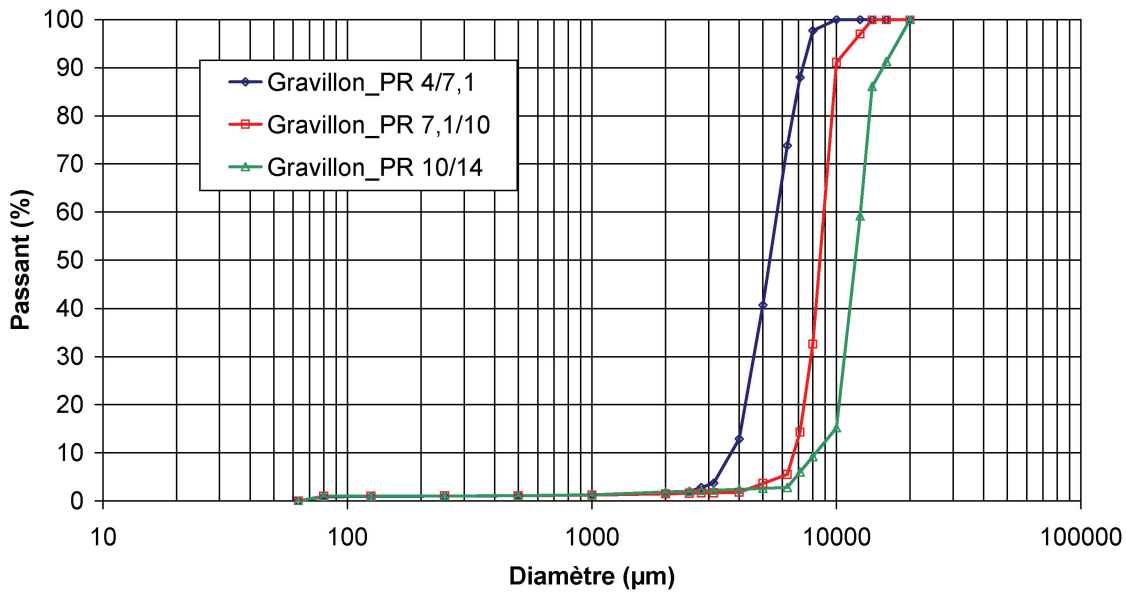


Figure A2. 2 : granulométrie des granulats PR

A3 Formulation des bétons

A3.1 Pré-formulation par méthode de Dreux-Gorisse et optimisation du squelette granulaire

Une préformulation du béton a été réalisée à l'aide de la méthode graphique de Dreux-Gorisse (*Dreux 1982*) :

- NR : Ciment_NR + Sable_NR + Gravier_NR ;
- R1 : Ciment_R + Sable_NR + Gravier_NR ;
- R2 : Ciment_R + Sable_NR + Gravier_PR.

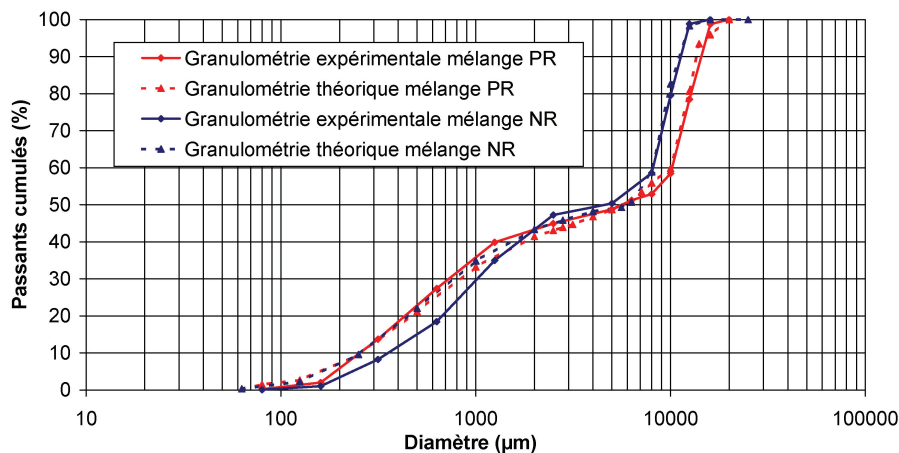
Après avoir vérifié la cohérence du rapport E/C et du dosage en ciment visés avec la résistance et l'ouvrabilité recherchées, des ébauches de squelettes granulaires ont été déterminées pour obtenir des mélanges granulaires les plus proches possibles des courbes de référence définies par la méthode de Dreux-Gorisse. Cette première détermination a été ensuite affinée à l'aide du logiciel RENE-LCPC (*Sedran & de Larrard 1994*) qui permet d'optimiser le squelette granulaire (i.e. ajuster au mieux les classes granulaires pour disposer d'un volume de pâte d'écartement optimal). Les proportions des différentes classes granulaires pour les deux mélanges granulaires nécessaires sont données dans le Tableau A2. 1 et le Tableau A2. 2. Les courbes granulométriques des deux mélanges granulaires sont données dans la Figure A2. 3.

Tableau A2. 1 : composition du mélange NR

	Proportion
Sable NR 0/2	48,0 %
Gravillon NR 4/8	5,6 %
Gravillon NR 8/12	46,4 %

Tableau A2. 2 : composition du mélange PR

	Proportion
Sable NR 0/2	44,8 %
Gravillon PR 4/7,1	6,4 %
Gravillon PR 7,1/10	1,6 %
Gravillon PR 10/14	47,2 %

**Figure A2. 3 : granulométrie des différents mélanges**

A3.2 Ajustements expérimentaux

A3.2.1 Essais de convenance

La donnée d'un squelette granulaire, d'un dosage en ciment et d'un rapport E/C suffit à définir les formules de béton qui nous sont nécessaires. La formulation obtenue en section A3.1 doit cependant être ajustée expérimentalement afin de s'assurer de l'ouvrabilité des matériaux et de la correspondance de leurs résistances avec la résistance cible définie dans le cahier des charges.

Différentes gâchées ont été réalisées en faisant varier la quantité d'eau. En effet, le dosage en ciment et le squelette granulaire étant fixés pour chaque formulation, le seul moyen de faire varier l'ouvrabilité, en l'absence d'adjuvants, est de jouer sur la quantité d'eau. Les résultats de ces essais sont donnés par la Figure A2. 4. Ces essais ont été réalisés sur un malaxeur de 30 litres. Les résultats montrent que l'on obtient des bétons correspondant à l'ouvrabilité visée pour un rapport E/C de 0,49.

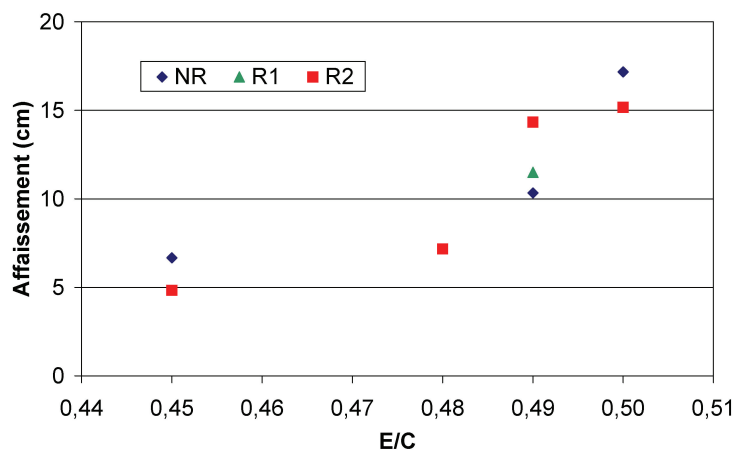


Figure A2. 4 : évolution de l'affaissement en fonction du rapport E/C

Des éprouvettes de béton coulées avec la formule de rapport E/C égal à 0,49 ont été testées en compression à 28 jours (sans application de cure thermique). Les résultats de ces essais sont consignés dans le Tableau A2. 3. Les résultats de ces essais montrent que les formules de béton ainsi déterminées (E/C = 0,49) correspondent aux critères fixés par le cahier des charges sur béton frais et béton durci.

Tableau A2. 3 : résultats des essais mécaniques sur éprouvettes durcies (28 jours – un cylindre 16-32 par formule) ; E/C = 0,49

	Résistance en compression (MPa)	Module d'Young (MPa)
NR	41	32 800
R1	48	37 300
R2	47	37 000

A3.2.2 Dépendance au malaxage

Le changement de malaxeur (changement de volume et de puissance de malaxage, présence ou non d'outils racleurs...) induit un changement dans la rhéologie du matériau frais. Les formulations validées par essais de convenance en section A3.2.1 sur un malaxeur de 30 litres nécessitent donc d'être ajustées sur le malaxeur de capacité utile de 170 litres utilisé pour la présente étude.

Afin de limiter les risques de dépendance au malaxage, l'ensemble des fabrications a été réalisé sur un même malaxeur de 170 litres. Des essais de gâchage de la formule R1 sur ce matériel mettant en œuvre différents volumes de béton ont conduit à figer le rapport E/C à une valeur de 0,46 (cf. Tableau A2. 4). Dans ces conditions, consistance et teneur en air occlus se sont avérés pratiquement constants dans la gamme des volumes fabriqués.

Tableau A2. 4 : répétabilité de fabrication du béton ; formule R1 ; E/C = 0,46

Volume de gâchage	Affaissement (cm)	Air occlus (%)
85 litres	10	2,5
125 litres	11	2,4
180 litres	9	2,5

A3.3 Procédure de malaxage

La procédure de malaxage appliquée est la suivante :

1. Introduction des matériaux secs dans le malaxeur (granulats puis ciment),
2. Malaxage pendant une minute,
3. Introduction de l'eau de gâchage,
4. Malaxage pendant 2 minutes 30 secondes,
5. Arrêt du malaxeur et vidange.

A3.4 Mise en œuvre

Une fenêtre de deux heures est prévue pour mettre les matériaux en œuvre afin de pouvoir gérer d'éventuels imprévus. La durée moyenne de mise en œuvre a été de une heure.

Pour les petits corps d'épreuve (cylindres, blocs de carottage), le remplissage des moules a été réalisé à la main. Le remplissage des coffrages de poutres a été assuré grâce à des trémies assurant un coulage plus rapide (nécessité d'enchaîner trois gâchées de 180 litres pour la fabrication des poutres).

La vibration des cylindres 11-22 a été assurée conformément à la norme NF P 18-421 (*AFNOR 1981-a*). Les poutres, blocs de carottage et cylindres de gonflement sous contraintes ont été vibrés à l'aide d'aiguilles conformément à la norme NF P 18-422 (*AFNOR 1981-b*).

Annexe 3 Qualification des moyens de mesure

A1	Incertitude de mesure par extensométrie à pointeaux.....	477
A2	Evaluation des incertitudes de répétabilité des mesures par robot	478
A3	Qualification des jauges pain de sucre pour la réalisation de mesures dimensionnelles	480
A3.1	Réponse à une sollicitation mécanique	480
A3.2	Mesure de gonflements	481
A4	Tests de jauges d'extensométrie pour aciers.....	482
A5	Qualification du banc de pesée	484

A1 Incertitude de mesure par extensométrie à pointeaux

Le calcul des déformations des éprouvettes de gonflement libre à l'aide de l'extensomètre à pointeaux est réalisé à partir de la relation :

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_t = \frac{D_t - D_0}{L_{\text{base}}} \\ D_t = \text{Déplacement relatif des plots à la date } t \\ D_0 = \text{Déplacement relatif des plots à la date } 0 \\ L_{\text{base}} = \text{Longueur de la base de mesure} = 107 \text{ mm (déterminée sur barre étalon)} \end{array} \right.$$

En différenciant cette expression, on obtient :

$$\left\{ \begin{array}{l} d\varepsilon_t = \frac{\partial \varepsilon_t}{\partial D_t} \cdot dD_t + \frac{\partial \varepsilon_t}{\partial D_0} \cdot dD_0 + \frac{\partial \varepsilon_t}{\partial L_{\text{base}}} \cdot dL_{\text{base}} \\ = \frac{1}{L_{\text{base}}} \cdot dD_t - \frac{1}{L_{\text{base}}} \cdot dD_0 - \frac{1}{L_{\text{base}}^2} \cdot (D_t - D_0) \cdot dL_{\text{base}} \end{array} \right.$$

Il est fait ici l'hypothèse que toutes les sources d'incertitude liées aux mesures sont indépendantes. L'incertitude type sur la déformation s'écrit donc :

$$u_{\varepsilon_t} = \sqrt{\frac{1}{L_{\text{base}}^2} \cdot u_{D_t}^2 + \frac{1}{L_{\text{base}}^2} \cdot u_{D_0}^2 + \frac{(D_t - D_0)^2}{L_{\text{base}}^4} \cdot u_{L_{\text{base}}}^2}$$

Le déplacement moyen des plots d'une éprouvette (D_t) est obtenu par moyennage des déplacements des plots sur chacune des trois génératrices notés G_{ti} (i variant de 1 à 3 et correspondant à chaque génératrice). Les déplacements des plots de chaque génératrice sont évalués quant à eux par la moyenne de trois mesures réalisées sur chaque base à l'aide de l'extensomètre à pointeaux et notées respectivement X_{ti1} , X_{ti2} et X_{ti3} . Le déplacement moyen des plots d'une éprouvette est donc issu de la moyenne de 9 valeurs. On a :

$$\left\{ \begin{array}{l} D_t = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 G_{ti} \text{ et donc } u_{D_t} = \sqrt{3 \cdot \frac{u_{G_{ti}}^2}{3^2}} \\ G_{ti} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 X_{tij} \text{ et donc } u_{G_{ti}} = \sqrt{3 \cdot \frac{u_{X_{tij}}^2}{3^2}} \end{array} \right.$$

L'étalonnage du capteur de l'extensomètre à pointeaux a permis de déterminer une incertitude élargie de $1,41 \mu\text{m}$. Il vient alors :

$$u_{G_{ti}} = \sqrt{3 \cdot \frac{1,41^2}{3^2}} = 0,814 \mu\text{m}$$

Il suit :

$$u_{D_t} = \sqrt{3 \cdot \frac{0,814^2}{3^2}} = 0,470 \mu\text{m}$$

Par ce même raisonnement, la procédure de mesure de D_0 étant identique à celle de D_t , il vient :

$$u_{D_0} = 0,470 \mu\text{m}$$

L'incertitude sur la longueur de la base de mesure est le fruit de deux contributions :

- l'erreur sur la mesure de la longueur de la base réalisée sur la barre étalon (avec un pied à coulisse de précision 10 μm),
- le décalage des plots d'extensométrie inhérent à la méthode de collage (une valeur moyenne de 100 μm a été mesurée sur un échantillon de 54 mesures issues de 24 bases différentes).

L'incertitude sur la longueur de base de mesure a donc été évaluée à :

$$u_{L_{\text{base}}} = 150 \mu\text{m}$$

En faisant l'hypothèse que les corps d'épreuve présenteront des gonflements maximaux de l'ordre de 1,5 % (correspondant à un déplacement relatif des plots de l'ordre de 1,5 mm), on peut alors estimer l'incertitude de la mesure par :

$$u_{e_t} = \sqrt{\frac{1}{107000^2} \cdot 0,470^2 + \frac{1}{107000^2} \cdot 0,470^2 + \frac{1500^2}{107000^4} \cdot 150^2} = 20,6 \cdot 10^{-6}$$

L'incertitude de mesure des gonflements libres par extensomètre à pointeaux est donc de l'ordre de 20,6 $\mu\text{m}/\text{m}$ (soit 0,00206 %).

A2 Evaluation des incertitudes de répétabilité des mesures par robot

Deux robots de mesure dimensionnelle sont utilisés pour le suivi des éprouvettes de gonflement sous contraintes. Ceux ci ont fait l'objet d'une qualification afin d'évaluer l'incertitude de répétabilité de ces dispositifs.

La procédure de mesure mise en œuvre lors de l'utilisation des robots est la suivante :

1. Montage du robot complet sur une éprouvette,
2. Réalisation d'un premier cycle de mesure (3*16 positions angulaires [de 0° à 300° avec un pas de 20°]*4 couples de capteurs),
3. Démontage/remontage du robot pour détection d'une erreur de remplacement du système,

4. Réalisation d'un deuxième cycle de mesure (3*16 positions*4 couples de capteurs),
5. Validation de la séquence de mesure par comparaison des deux cycles et évaluation des écarts.

Deux essais de qualification ont été réalisés :

Essai n°1 : Evaluation de l'erreur de répétabilité entre deux cycles de mesure

Pour cet essai, on réalise 10 cycles de mesure de manière consécutive sur une même éprouvette en montant et démontant l'automate de mesure, représentant ainsi l'opération réalisée entre deux cycles de mesure. On évalue l'erreur de répétabilité en utilisant l'écart type des déformations ainsi mesurées :

Robot n°1		
Mesure	Déformation radiale	Déformation axiale
"Point zéro"	0,0000%	0,0000%
1	0,0017%	0,0012%
2	-0,0002%	0,0017%
3	0,0000%	0,0022%
4	0,0019%	0,0024%
5	0,0003%	0,0022%
6	-0,0003%	0,0021%
7*	0,0001%	0,0483%
8*	0,0013%	0,0426%
9*	-0,0026%	1,2857%
Ecart type	0,0013%	0,4247%
Ecart type sans points aberrants	0,0013%	0,0004%

Robot n°2		
Mesure	Déformation radiale	Déformation axiale
"Point zéro"	0,0000%	0,0000%
1	-0,0007%	-0,0004%
2	-0,0007%	-0,0004%
3	-0,0003%	0,0001%
4	-0,0010%	0,0001%
5	0,0003%	-0,0001%
6	-0,0019%	-0,0002%
7	0,0000%	-0,0002%
8	-0,0010%	-0,0001%
9*	-0,0028%	-0,4771%
Ecart type	0,0009%	0,1590%
Ecart type sans points aberrants	0,0009%	0,0002%

On obtient donc dans ce cas une erreur de répétabilité de l'ordre de 9 à 13 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour les mesures radiales et de 2 à 4 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour les mesures axiales.

Essai n°2 : Evaluation de l'erreur de répétabilité entre deux séquences de mesure

Pour cet essai, on réalise dix cycles de mesure de manière consécutive sur une même éprouvette en montant et démontant l'ensemble du système (y compris le moteur), représentant ainsi l'opération réalisée entre deux séquences de mesure. On évalue l'erreur de répétabilité en utilisant l'écart type des déformations ainsi mesurées.

On obtient une erreur de l'ordre de 11 à 13 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour les mesures radiales et de 2 à 3 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour les mesures axiales. Le démontage complet du dispositif n'introduit donc pas une erreur supplémentaire considérable. Ces valeurs sont similaires à celles avancées par (Multon 2004).

Robot n°1			Robot n°2		
Mesure	Déformation radiale	Déformation axiale	Mesure	Déformation radiale	Déformation axiale
"Point zéro"	0,0000%	0,0000%	"Point zéro"	0,0000%	0,0000%
1	0,0017%	0,0000%	1	-0,0020%	0,0004%
2	0,0015%	-0,0007%	2	0,0014%	0,0005%
3	0,0017%	-0,0006%	3	-0,0004%	0,0005%
4	0,0040%	-0,0005%	4	0,0017%	0,0004%
5	0,0015%	0,0001%	5	-0,0003%	0,0007%
6	0,0002%	-0,0006%	6	-0,0017%	0,0007%
7	0,0011%	-0,0005%	7	0,0011%	0,0007%
8	0,0011%	-0,0007%	8	-0,0007%	0,0008%
9	0,0007%	-0,0010%	9	-0,0005%	0,0009%
Ecart type	0,0011%	0,0003%	Ecart type	0,0013%	0,0002%

A3 Qualification des jauges pain de sucre pour la réalisation de mesures dimensionnelles

A3.1 Réponse à une sollicitation mécanique

Afin de remplacer les cordes vibrantes (prévues pour être noyées dans le béton mais ne résistant pas aux conditions agressives de la cure thermique) et pour disposer de mesures de déformations locales internes, des jauges de déformation à noyer dans le béton dites jauges « Pain De Sucre » (PDS) ont été testées. Il s'agit de jauges résistives encapsulées qui peuvent être noyées dans le béton (EGP-5-120 de marque Vishay). Leur liaison mécanique avec le corps d'éprouve est assurée par adhérence.

La résistance de ces capteurs à la cure thermique a été vérifiée. Des tests de réponse à une sollicitation mécanique en domaine élastique ont été réalisés pour juger de la pertinence de la mesure effectuée après une cure thermique : une jauge PDS a été noyée dans du béton suivant l'axe d'une éprouvette ($\varnothing = 13$ cm ; H = 24 cm). L'ensemble a été soumis à une cure thermique. Après démoulage et rectification des faces supérieure et inférieure, trois jauges de déformation pour béton (type PL120 de marque Vishay) ont été collées à 120° , parallèlement à l'axe de l'éprouvette. Ce corps d'éprouve a ensuite été soumis à trois cycles de compression entre 5 % et 30 % de la résistance en compression du béton estimée à 40 MPa. Il s'agit ensuite de comparer les modules d'Young mesurés par ces deux types d'instrumentation (les mesures issues des jauges PL120 sont moyennées). La Figure A3. 1 représente les résultats obtenus lors de cet essai. La mesure du module d'Young à l'aide de la jauge PDS donne une valeur d'environ 32200 MPa alors que celle issue des données des jauges PL120 donne environ 30200 MPa, soit un écart d'environ 7 % ce qui semble tout à fait acceptable à la lumière des éléments présentés par (Toutlemonde 1999). Cette différence peut s'expliquer par des écarts de positionnement des capteurs par rapport à l'axe de l'éprouvette d'une part et par l'influence d'une plus grande quantité de pâte de ciment en surface (module plus faible) en raison des effets de parois (Sedran & de Larrard 1994). En tout état de cause, cet essai met en évidence le bon fonctionnement des jauges PDS à l'issue de la cure.

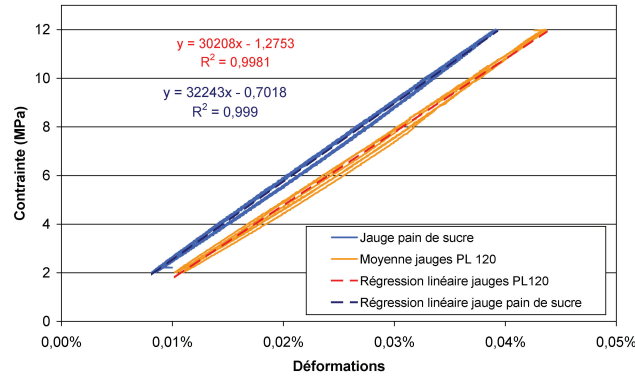


Figure A3. 1 : comparaison des déformations estimées par la jauge pain de sucre et par la moyenne de trois jauges de déformations collées sur les faces latérales

A3.2 Mesure de gonflements

Afin d'évaluer le comportement à long terme des jauges pain de sucre, le corps d'épreuve décrit en section A3.1 a été équipé de bases de mesure pour extensométrie à pointeaux puis conservé immergé en eau. Un suivi dimensionnel a ensuite été réalisé en parallèle de l'acquisition du signal de la jauge pain de sucre.

La jauge a résisté aux conditions de conservation durant plus de 100 jours. Les dernières mesures exploitables indiquent une déformation de 0,25 % soit 2500 μ def (cf. Figure A3. 2). Il semble donc que la jauge ait cédé sous les effets d'une trop grande déformation (rupture de la trame de la jauge). La Figure A3. 2.b indique que le suivi des déformations par jauge noyée met en évidence un gonflement d'imbibition (durant environ deux jours) non détecté par la méthode d'extensométrie de surface.

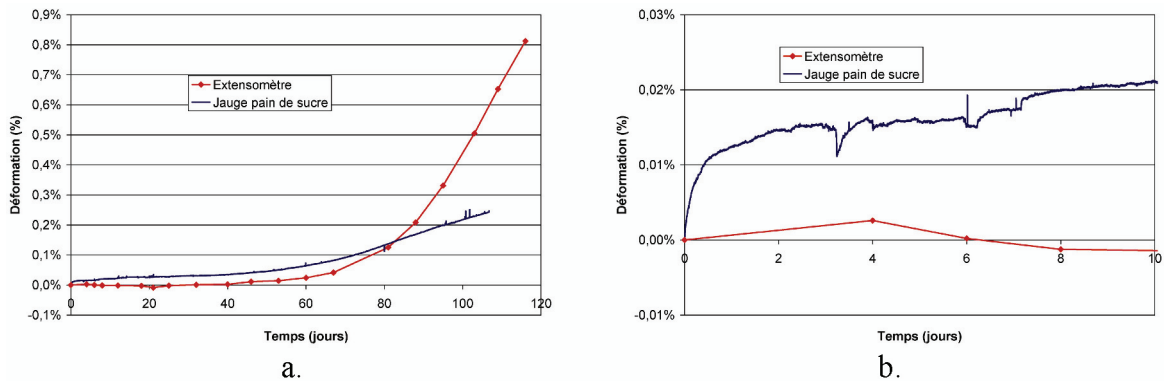


Figure A3. 2 : confrontation des suivis dimensionnels par extensométrie et par jauge pain de sucre (a. vue d'ensemble ; b. zoom)

Les données issues du suivi par extensométrie ont donc été corrigées de cet écart (cf. Figure A3. 3). Le décalage introduit est égal à la déformation mesurée par jauge à une échéance de deux jours. L'évolution générale des déformations évaluées par les deux méthodes est similaire. Néanmoins, on observe un écart notable en fonction de l'approche considérée.

En début de suivi (i.e. jusqu'à environ 80 jours), l'estimation par jauge noyée est plus élevée que celle obtenue à l'aide de l'extensomètre. L'écart maximal est ainsi de l'ordre de 0,025 % soit environ 25 μ m pour une base de mesure de 100 mm. Si cet écart traduit effectivement un phénomène physico-chimique, ceci implique que les gonflements

se développent plus rapidement à cœur qu'en surface. Ceci ne semble néanmoins pas en accord avec le phénomène de pénétration du front d'imbibition dans le matériau qui favorise a priori l'augmentation de l'humidité et de la lixiviation des alcalins (et donc des gonflements) en surface.

Pour des déformations supérieures à 0,15 %, on observe un écart très significatif entre les deux techniques expérimentales. Cet écart pourrait être expliqué par un effet d'armature de la jauge pain de sucre, conduisant à des déformations moins importantes. Cette considération semble en accord avec les travaux de (*Lawrence 1995-a*). Ceci implique qu'il existe un gradient de déformation entre le cœur et la surface de l'éprouvette. Par ailleurs, la fissuration du matériau à ce stade des expansions peut également jouer un rôle en altérant la liaison mécanique entre la jauge noyée et le béton environnant.

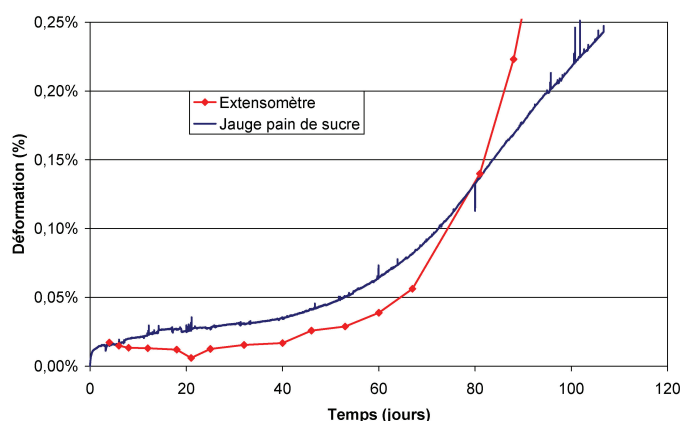


Figure A3.3 : confrontation des suivis dimensionnels par extensométrie et par jauge pain de sucre après recalage

A4 Tests de jauges d'extensométrie pour aciers

Devant les conditions agressives d'exposition des moyens d'instrumentation noyés dans le cadre de cette étude (température, agressions chimiques...), différentes solutions de mise en place de jauges d'extensométrie ont été testées préalablement aux fabrications de corps d'épreuve. Les différentes technologies étudiées sont listées dans le Tableau A3. 1, le Tableau A3. 2 et le Tableau A3. 3.

Tableau A3. 1 : liste des types de jauge étudiés

Fournisseur	Modèle	Dimensions frame (mm)	Nature
BFI Optilas (TML)	FLA 5-11-3LT	1,5x5	Jauge collée
BFI Optilas (TML)	WFLA 3-11-3L	1,7x3 (8x17 avec encapsulage)	Jauge collée encapsulée résistante à l'eau
BFI Optilas (TML)	QFLA 5-11-3LT	1,5x5	Jauge collée résistante aux hautes températures
BFI Optilas (TML)	AWC-8B-11-3LT	8 (longueur élément sensible) (5x28 avec encapsulage)	Jaugée soudée encapsulée

Tableau A3. 2 : liste des types de colle étudiés

Fournisseur	Modèle	Remarque
BFI Optilas	CN	-
BFI Optilas	P2	-
Vishay	M Bond 200	-
BFI Optilas	NP50	-
Vishay	ME 10	Colle à cuire

Tableau A3. 3 : liste des protections étudiées

Fournisseur	Modèle	Nature
HBM	ABM 75	Mastic
HBM	AK 22	Mastic
Vishay	M coat A	Vernis
Vishay	M coat F	Mastic+revêtement
HBM	SG 250	Silicone
HBM	SL 450	Silicone

Les différentes configurations testées et les résultats correspondants sont listés dans le Tableau A3. 4.

Tableau A3. 4 : test des méthodes de mise en oeuvre de jauges d'extensométrie pour acier

Béton	Géométrie corps d'épreuve	Acier	Jauge	Fixation	Protection	Etat final
R1	Bloc 0,25x0,50x0,40 m	Ø 16 mm	FLA	CN	M coat A SG250 ABM 75	Jauge détruite pendant la cure thermique
R1	Bloc 0,25x0,50x0,40 m	Ø 16 mm	FLA	CN	M coat A SL450 ABM 75	Jauge détruite pendant la cure thermique
R1	Bloc 0,25x0,50x0,40 m	Ø 16 mm	WFLA	CN	M coat A SG250 ABM 75	Fonctionnement OK en fin de cure mais réponse non conforme de la jauge
R1	Bloc 0,25x0,50x0,40 m	Ø 16 mm	WFLA	CN	M coat A SL450 ABM 75	Fonctionnement OK en fin de cure mais réponse non conforme de la jauge
R1	Cylindre 11-22	Ø 8 mm	WFLA avec découpe de l'encapsulage	CN	SG250	Fonctionnement OK en fin de cure thermique Etat mécanique de l'encapsulage dégradé Décollage de la jauge Pas d'eau entre la jauge et l'acier
R1	Cylindre 11-22	Ø 12 mm	QFLA	NP 50	M coat A SG250 AK 22	Jauge HS en fin de cure Décollement de la trame
R1	Cylindre 11-22	Ø 12 mm	WFLA	NP 50	M coat A SG250 AK 22	Jauge HS en fin de cure Décollement de la trame
R1	Cylindre 11-22	Ø 12 mm	QFLA	M Bond 200	M coat A SG250 AK 22	Jauge HS en fin de cure Décollement de la trame
R1	Cylindre 11-22	Ø 12 mm	WFLA	M Bond 200	M coat A SG250 AK 22	Jauge HS en fin de cure Décollement de la trame
R1	Cylindre 11-22	Ø 12 mm	QFLA	CN	M coat A SG250 AK 22	Jauge HS en fin de cure Décollement de la trame
R1	Cylindre 11-22	Ø 12 mm	WFLA	CN	M coat A SG250 AK 22	Jauge HS en fin de cure Décollement de la trame
R1	Cylindre 11-22	Ø 12 mm	QFLA	P2	M coat A SG250 AK 22	Jauge HS en fin de cure Décollement de la trame
R1	Cylindre 11-22	Ø 12 mm	WFLA	P2	M coat A SG250 AK 22	Jauge HS en fin de cure Décollement de la trame
R1	Cylindre 11-22	Ø 12 mm	AWC (changement de câble pour diminution de l'inclusion)	Soudée	M coat A SG250 AK 22	Fonctionnement OK en fin de cure
R1	Cylindre 11-22	Ø 12 mm	QFLA	ME 10	Protection spécifique ME 10	Fonctionnement OK en fin de cure

A5 Qualification du banc de pesée

Une qualification du banc de pesée a été réalisée afin d'évaluer l'erreur de répétabilité existant entre deux mesures : 13 masses étalon de 200 g à 3 kg ont été pesées suivant le protocole de pesée mis en œuvre au cours de l'étude puis les pesées obtenues par le banc ont été confrontées aux masses réelles des étalons. Les résultats de cet essai sont représentés sur la Figure A3. 4 :

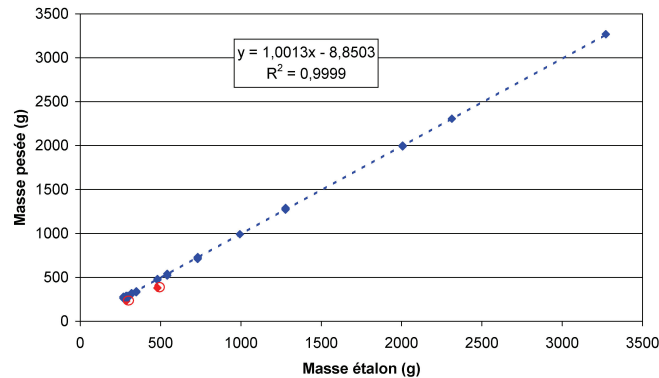


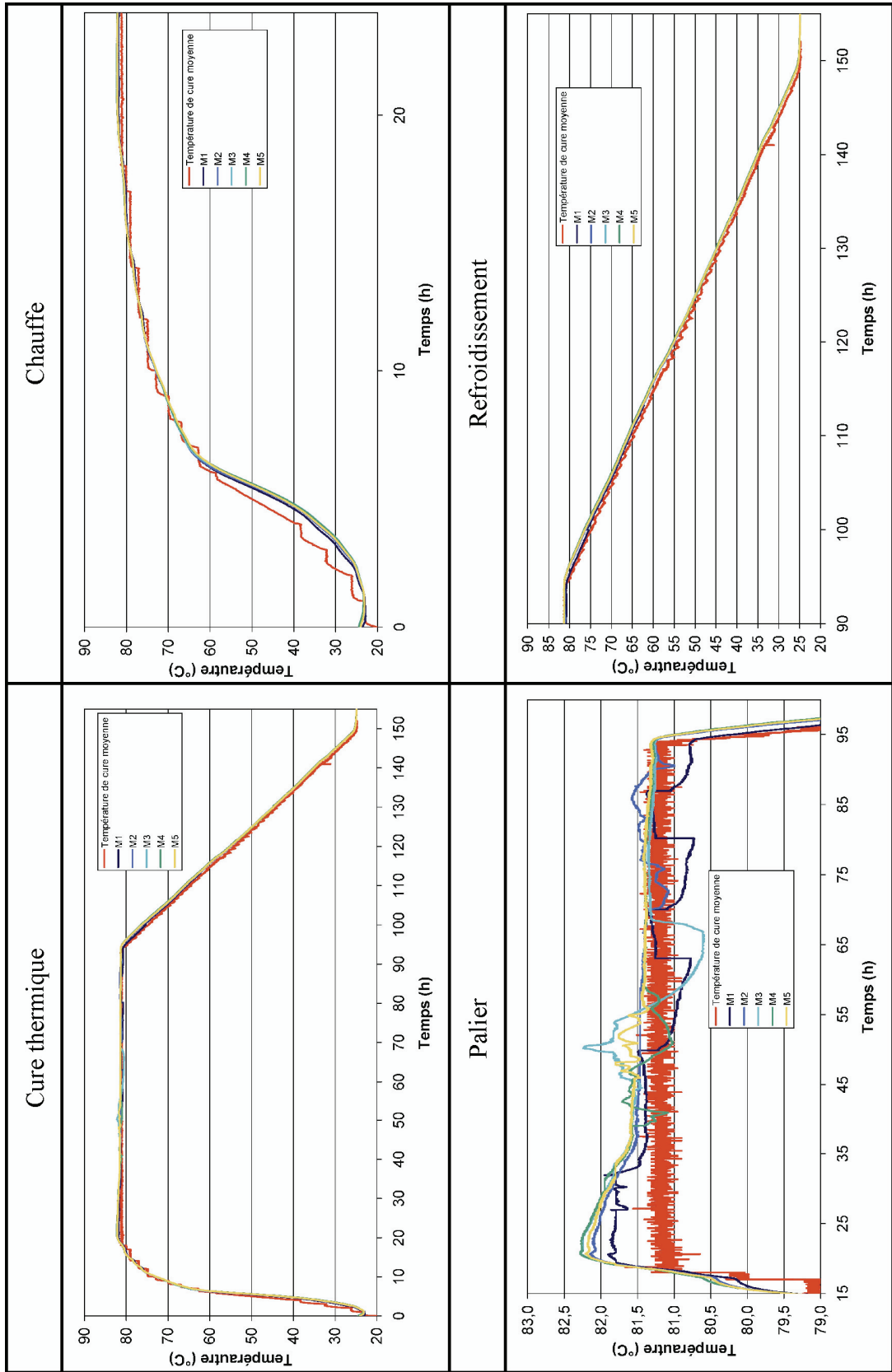
Figure A3. 4 : essai de qualification du banc de pesée

Les résultats bruts de cet essai montrent un écart type de répétabilité de 19 g. En supprimant les points aberrants (entourés sur le graphe), action réalisable en effectuant des mesures suffisamment rapprochées dans le temps, on aboutit à une incertitude de répétabilité de 9 grammes (sur environ 1 tonne) cohérente avec les résultats de (*Multon et al. 2004*).

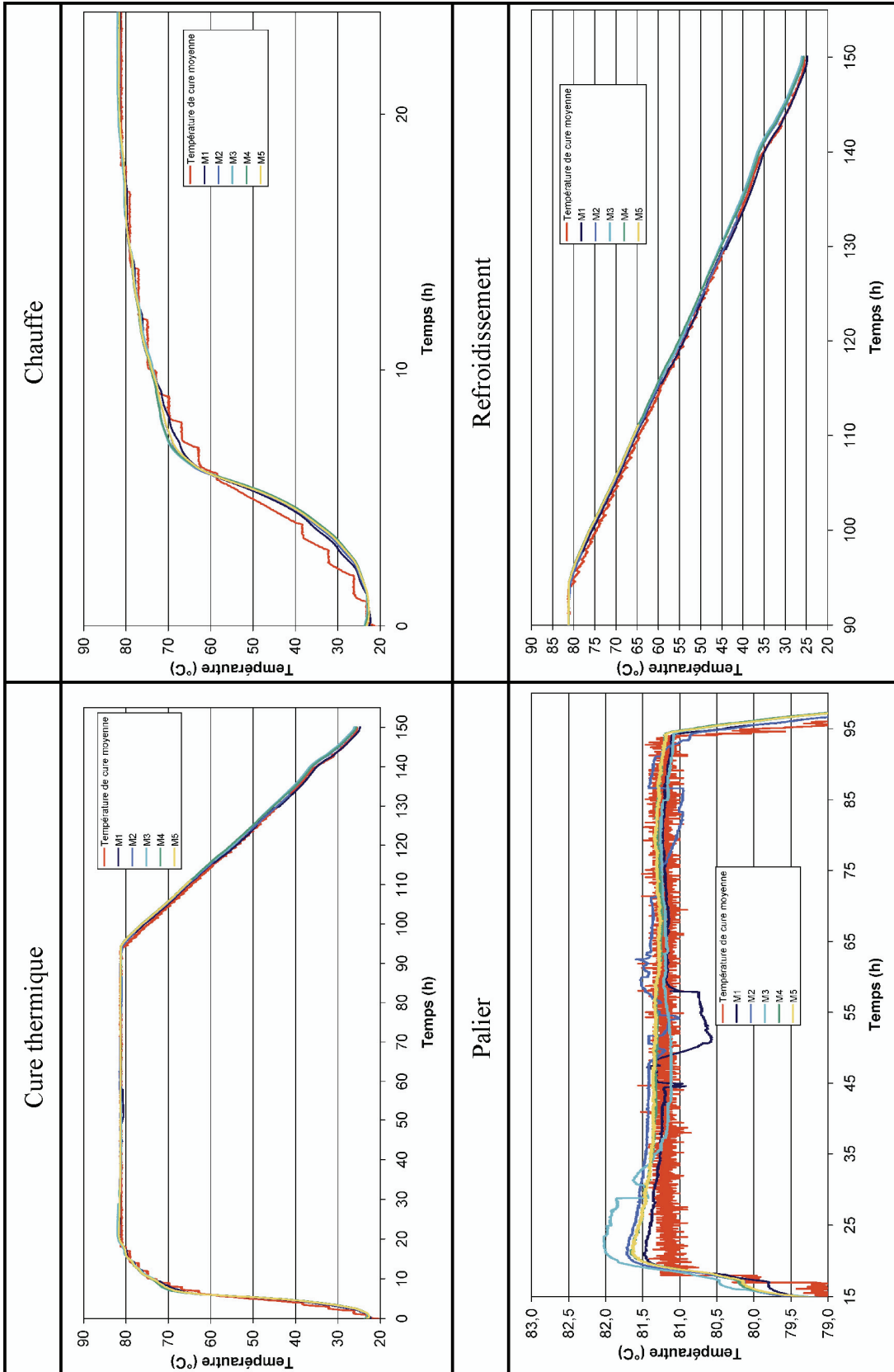
Annexe 4 Suivi thermique des poutres en phase de cure thermique

A1	Poutre P1	487
A2	Poutre P2	488
A3	Poutre P3	489
A4	Poutre P4	490
A5	Poutre P5	491
A6	Poutre P6	492

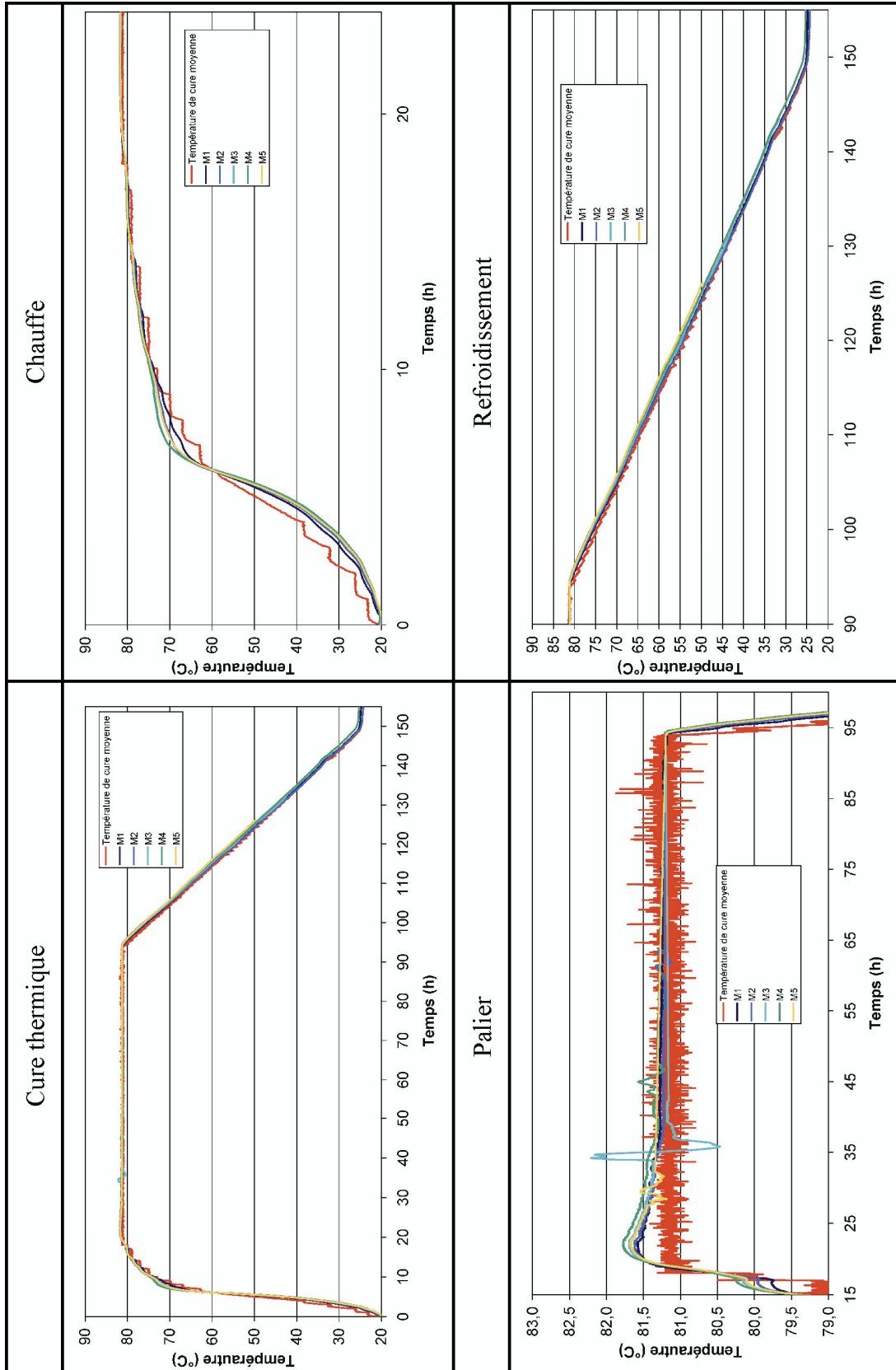
A1 Poutre P1



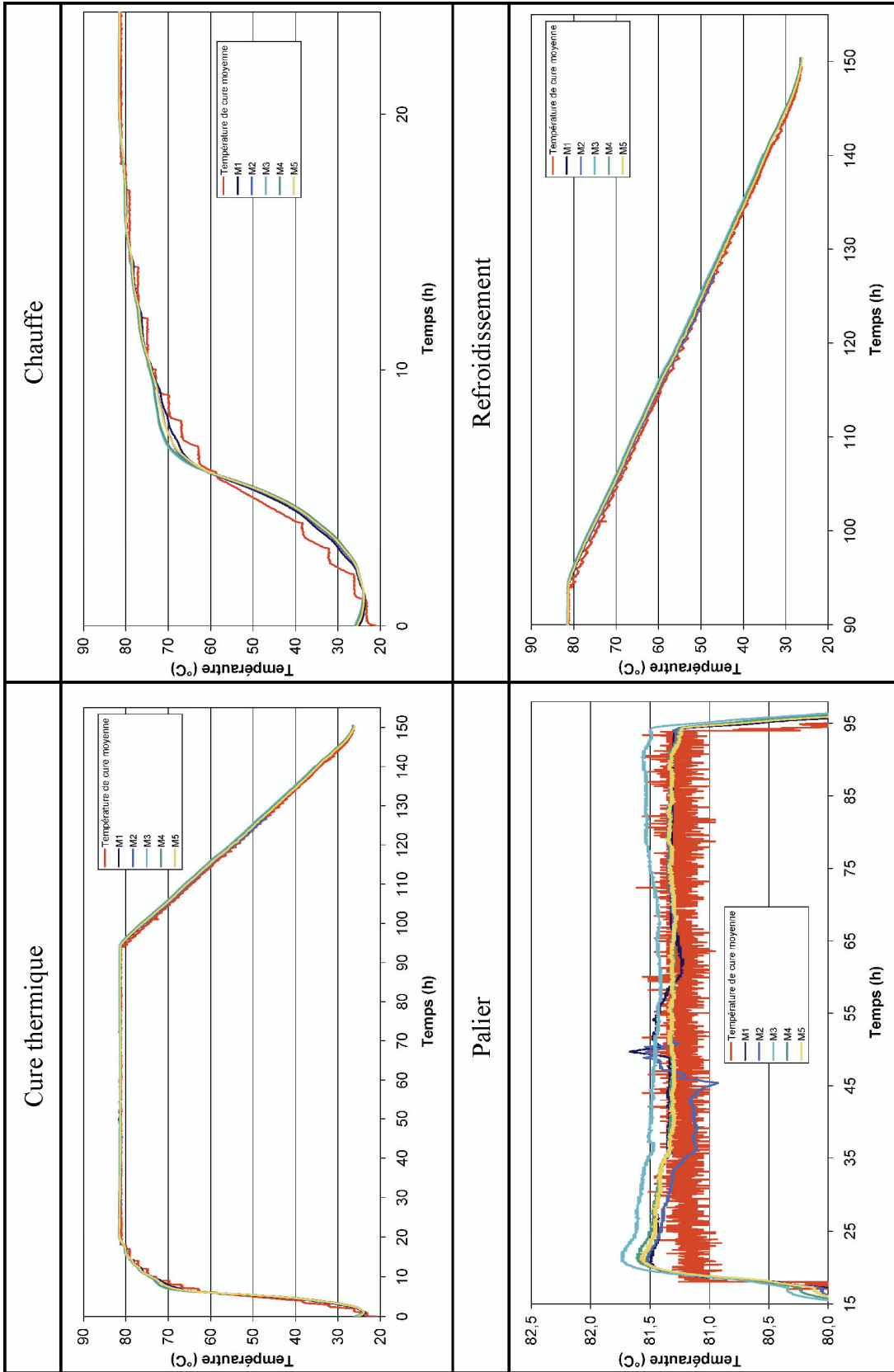
A2 Poutre P2



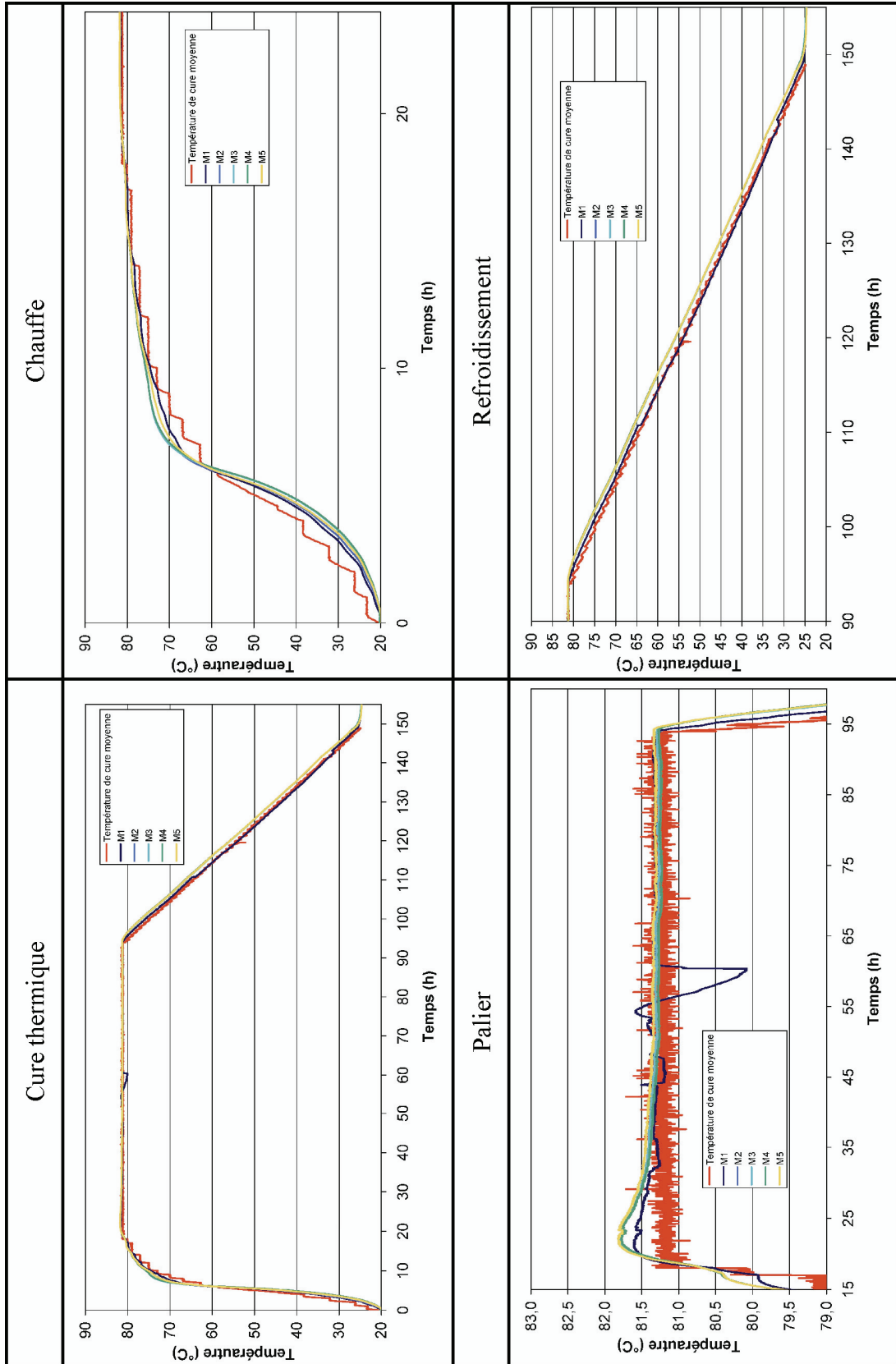
A3 Poutre P3



A4 Poutre P4



A5 Poutre P5



A6 Poutre P6

