
Chapitre 2 Programme expérimental : définition, mise au point, qualifications et fabrications

1	Définition du programme expérimental	99
1.1	Objectifs généraux du programme	99
1.2	Programme expérimental	100
1.2.1	Réactivité des matériaux	100
1.2.2	Caractérisation des effets de la RSI à l'échelle du matériau : essais sur éprouvettes	101
1.2.2.1	Quantification des couplages entre humidité et gonflements	102
1.2.2.1.1	Essais de gonflement libre	102
1.2.2.1.2	Essais d'expansion résiduelle : influence de l'échéance de carottage	104
1.2.2.1.3	Investigations complémentaires	106
1.2.2.2	Quantification des couplages entre contraintes et gonflements	107
1.2.2.3	Suivi des performances mécaniques	109
1.2.2.4	Caractérisation de la lixiviation des alcalins	110
1.2.2.4.1	Phase de cure thermique	110
1.2.2.4.2	Phase de suivi des corps d'épreuve	111
1.2.3	Caractérisation des effets mécaniques de la RSI à l'échelle de la structure : essais sur poutres	112
1.2.3.1	Description des corps d'épreuve	112
1.2.3.2	Conditions de conservation	113
1.2.3.3	Données collectées	114
1.2.3.3.1	Suivi mécanique	114
1.2.3.3.2	Suivi hydrique	115
1.2.3.3.3	Suivi thermique	115
1.2.3.4	Echéance de démarrage des essais	116
1.2.4	Synthèse	116
2	Mises au point, qualification et méthodes	119
2.1	Matériaux	119
2.1.1	Formulation des matériaux	119
2.1.1.1	Cahier des charges	119
2.1.1.1.1	Performances visées	119
2.1.1.1.2	Constituants	119
2.1.1.2	Formulation	120
2.1.2	Caractérisation exothermique	121
2.1.3	Caractérisation mécanique	122
2.1.3.1	Performances mécaniques	122
2.1.3.2	Coefficient de dilatation thermique	122
2.1.3.3	Masse volumique	123
2.1.4	Caractérisation microscopique	123
2.2	Potentiel de RSI d'origine thermique : application d'une cure thermique	125
2.2.1	Objectifs	125
2.2.2	Mise au point théorique : cahier des charges	125
2.2.2.1	Humidité	125
2.2.2.2	Histoire thermique des poutres et des éprouvettes	125
2.2.2.3	Palier de température	126
2.2.2.3.1	Durée	126
2.2.2.3.2	Température	127
2.2.2.4	Refroidissement	129
2.2.2.5	Conclusion : définition du traitement thermique	129

2.2.3	Validation théorique : modélisation du traitement thermique	131
2.2.3.1	Caractéristiques des modèles	131
2.2.3.2	Réponse thermique d'une poutre – formule R1	131
2.2.3.3	Effets de l'inertie thermique : influence des dimensions des corps d'épreuve ..	133
2.2.3.4	Robustesse du traitement thermique	133
2.2.3.5	Risque de fissuration d'origine thermique	134
2.2.3.6	Conclusions.....	135
2.2.4	Réalisation expérimentale : méthodes et validation.....	135
2.2.4.1	Dispositif expérimental.....	135
2.2.4.1.1	Système de cure thermique	135
2.2.4.1.2	Performances.....	136
2.2.4.1.3	Réalisation expérimentale de la cure thermique.....	136
2.2.4.2	Réponse thermique expérimentale d'une poutre – formule R1.....	137
2.2.4.3	Maîtrise des effets d'échelle	140
2.2.4.4	Robustesse du traitement thermique	141
2.2.4.5	Répétabilité du traitement thermique.....	143
2.2.4.6	Prévention de la lixiviation des alcalins.....	144
2.2.5	Conclusions	145
2.3	Qualification des moyens expérimentaux.....	146
2.3.1	Suivis dimensionnels.....	146
2.3.1.1	Essais sur éprouvettes.....	146
2.3.1.1.1	Suivi dimensionnel par extensométrie à pointeaux – essais de gonflement libre	146
2.3.1.1.2	Suivi dimensionnel par robot semi-automatique – essais de gonflement sous contraintes	147
2.3.1.2	Essais sur poutres.....	150
2.3.1.2.1	Instrumentation externe.....	150
2.3.1.2.2	Instrumentation interne	152
2.3.1.2.3	Traitement des données.....	154
2.3.2	Contrôle des conditions de conservation et suivi hydrique.....	155
2.3.2.1	Conditions de conservation.....	155
2.3.2.1.1	Salle à « 38°C / 30 % HR ».....	155
2.3.2.1.2	Réacteurs à 100 % HR	155
2.3.2.1.3	Scellement hydrique.....	156
2.3.2.1.4	Conservation en eau.....	156
2.3.2.2	Suivi hydrique des poutres.....	156
2.3.2.2.1	Capteurs d'humidité relative	156
2.3.2.2.2	Suivi de la teneur globale en eau : pesée.....	157
2.3.2.2.3	Suivi de la teneur locale en eau : méthode de gammadensimétrie	158
3	Retour d'expérience des fabrications	159
3.1	Fabrications des bétons.....	159
3.2	Traitement thermique.....	163
3.2.1	Dispositif de cure thermique.....	163
3.2.2	Traitement thermique des poutres	164
3.2.3	Lixiviation des alcalins.....	167
3.3	Conclusions	168

1 Définition du programme expérimental

1.1 Objectifs généraux du programme

La gestion des ouvrages atteints de RSI nécessite de disposer d'outils permettant d'établir des diagnostics fiables et d'outils de re-calcul des structures concernées afin d'évaluer leur intégrité structurelle, leur aptitude au service et leur durabilité à un instant donné et de prédire leur évolution dans le temps. Pour cela, il est nécessaire de comprendre finement les effets mécaniques de cette pathologie à l'échelle du matériau mais également à celle d'une structure. Afin de constituer une base de données expérimentales sur les effets mécaniques de la RSI permettant d'apporter des éléments de réponses à ces questions, le programme expérimental correspondant aux travaux présentés dans ce mémoire ambitionne principalement d'apporter des éléments de réponse aux interrogations suivantes :

- Quantifier les effets de l'humidité sur le développement de réactions sulfatiques internes :

Cet objectif découle des résultats de suivis d'ouvrages (*Mielenz et al. 1995, Lawrence et al. 1999, Divet 2003, Godart 2006, Boenig et al. 2009*) mettant en évidence des dégradations plus importantes dans les zones les plus humides (fondations en sol humide, piles d'ouvrage dans un cours d'eau) et/ou soumises à des cycles d'humidification/séchage (piles de pont en zone de marnage, chevêtres exposés aux eaux de ruissellement). De même, dans le cas de structures massives, la possibilité de maintenir à cœur une humidité élevée pendant de longues périodes peut induire des risques d'expansion qu'il convient d'étudier. Les études menées en laboratoire sur ce point se révèlent en accord avec les observations *in situ*, indiquant une augmentation des expansions avec l'humidité ambiante (*Diamond 2000, Famy et al. 2001, Graf 2007*). Le contrôle de l'humidité ambiante semble ainsi être un des moyens utiles au contrôle des expansions même s'il se révèle être difficile à mettre en œuvre (*Kretz et al. 2007*) ;

- Quantifier l'influence des contraintes appliquées sur les gonflements :

Toute partie d'ouvrage est soumise à un état de contrainte inhérent au fonctionnement de la structure. A l'instar des phénomènes observés pour la Réaction Alkali-Granulat (RAG) étudiée par S. Multon (*Multon 2004*), le programme expérimental vise à quantifier les couplages éventuels entre contraintes et gonflements et donc à caractériser l'anisotropie induite éventuelle des phénomènes de RSI (*Multon & Toutlemonde 2006*) ;

- Disposer de données sur structures simples pour valider des méthodes de re-calcul :

Afin de valider les outils numériques développés par exemple par (*Baghdadi et al. 2007-b*), le programme expérimental a pour ambition de générer des données sur structures simples soumises à des conditions de chargement climatique (humidité, température) et mécanique variables et contrôlées dans le temps et dans l'espace ;

- Etudier le cas de la superposition RAG-RSI :

Les observations *in situ* mettent souvent en évidence une concomitance des phénomènes de RAG et de RSI (*Mielenz et al. 1995, Shayan & Ivanusec 1996, Meland et al. 1997, Santos Silva et al. 2008*). L'étude bibliographique a ainsi montré l'existence de couplages chimiques et mécaniques entre ces deux pathologies (cf. Chapitre 1). Une partie du programme expérimental a donc comme finalité l'étude de ces phénomènes en accord avec les trois objectifs mentionnés précédemment.

Le programme expérimental élaboré dans le cadre d'un partenariat LCPC-EDF s'inspire de celui réalisé dans le cadre de la thèse de S. Multon sur l'étude de la RAG (Multon 2004). Ces deux pathologies ayant des effets macroscopiques proches, cette démarche a semblé intéressante sur plusieurs plans : ceci permet d'une part de disposer du retour d'expérience des essais déjà réalisés (moyens de mesure, installations, techniques de mise en œuvre) et d'autre part d'envisager des comparaisons entre les résultats de la présente étude et ceux de (Multon 2004).

Une grande partie des moyens expérimentaux de (Multon 2004) a été réutilisée en veillant à tenir compte des amplitudes de gonflement considérablement plus importantes pour la RSI. Ainsi, pour les mesures de déplacements et de déformations, l'ensemble de l'instrumentation a été redimensionnée pour pouvoir mesurer des déformations de l'ordre de 1,5 %.

Afin d'évaluer les effets de la pathologie en fonction de l'amplitude et des cinétiques de réaction, différentes réactivités de formules ont été envisagées.

Des expérimentations sur éprouvettes ont été prévues pour caractériser les effets de la pathologie à l'échelle du matériau. Une première famille d'éprouvettes est utilisée pour quantifier les couplages existant entre humidité et gonflements en mesurant les déformations d'éprouvettes de béton pour différentes conditions d'exposition à l'humidité. Une seconde famille d'éprouvettes permet de quantifier l'influence de l'état de contraintes existant dans le matériau sur le développement des gonflements de RSI. Pour cela, on mesure les déformations d'éprouvettes soumises à différents états de contraintes tridimensionnels par l'intermédiaire de bâtis de fluage et/ou d'anneaux d'étreinte. Enfin, une dernière série d'éprouvettes est dédiée au suivi des performances mécaniques (module d'Young, coefficient de Poisson, résistances en compression et en traction).

Afin de disposer de données sur structures simples pour la validation de méthodes de re-calcul, des poutres armées ou non sont fabriquées et soumises à des conditions d'exposition à l'humidité variables dans le temps et dans l'espace. Les déformations de ces structures sont suivies de manière locale et globale. Une caractérisation locale et globale de la teneur en eau a également été prévue. La réalisation de mesures à différentes échelles permet d'une part de disposer de données précises à confronter aux résultats des modèles de calcul, et d'autre part d'évaluer les couplages existant entre les conditions de conservation des corps d'épreuve et les effets mécaniques de la RSI.

1.2 Programme expérimental

1.2.1 Réactivité des matériaux

Trois formulations de béton sont mises en œuvre pour chaque type de corps d'épreuve considéré :

- une formulation voulue Non Réactive (NR) devant servir de témoin et permettant de discerner vieillissement naturel et phénomènes pathologiques du béton dans les conditions expérimentales envisagées ;
- une formulation réactive vis-à-vis de la RSI (R1) ;
- une formulation réactive vis-à-vis de la RSI et de la RAG (R2).

Les différentes réactivités sont obtenues par combinaison de ciments potentiellement réactifs vis-à-vis de la RSI (la réactivité étant évaluée sur la base de la composition) et de granulats réactifs ou non vis-à-vis de la RAG.

Ces trois formules doivent être similaires en termes de résistance et de porosité et ce afin de faciliter les comparaisons des résultats correspondant aux différents corps d'épreuve. En particulier, un affaissement de l'ordre de 10 ± 2 cm est visé. La résistance en compression souhaitée est de l'ordre de 40 MPa à 28 jours. Le détail de la formulation et de la fabrication des bétons est donné en section 2.

Pour générer les gonflements de RSI, l'ensemble des corps d'épreuve est soumis à une cure thermique. Celle-ci a pour objectif de simuler les conditions régnant au cœur d'une pièce massive (pile ou chevet de pont, élément de barrage...) après coulage quand les dispositions appropriées pour limiter la température n'ont pas été prises (*Kretz et al. 2007*). La température étant un paramètre déterminant pour le développement de RSI (notamment en termes de cinétique et d'amplitude des déformations), ce traitement thermique devra être le plus similaire possible pour l'ensemble des corps d'épreuve, quelles que soient les considérations de composition et géométrie des corps d'épreuve.

Après cure et instrumentation, les corps d'épreuve sont conservés à une température de 38°C afin d'accélérer les phénomènes de RAG (*Larive 1998*) et de séchage (*Multon & Toutlemonde 2004*), le cas échéant.

Contrairement à nos attentes initiales, l'application d'une cure thermique représentative d'une pièce massive à la formule NR a conduit au développement de gonflements (cf. Chapitre 3). Pour pallier ce problème, une formulation « alternative » ou Béton Témoin (noté BT) a été ajoutée au programme. Il s'agit d'une formule de composition identique à NR mais non soumise à la cure thermique. Néanmoins, pour reproduire les conditions de cure hydrique des autres matériaux, les corps d'épreuve mettant en œuvre la formule BT ont été conservés en eau à 20°C pendant une période d'une durée identique au traitement thermique (soit environ une semaine).

Si cette technique expérimentale permet effectivement de disposer d'un matériau ne développant aucune expansion, elle conduit néanmoins à la fabrication de matériaux de microstructure différente (*Kjelssen & Detwiler 1992, Paul & Glasser 2000, Famy et al. 2002-b*).

Par ailleurs, afin d'évaluer le potentiel de gonflements de RAG en l'absence de cure thermique, la formule R3 a été mise en œuvre. Ce matériau de composition identique à R2 n'est soumis à aucun traitement thermique mais est conservé en eau à 20°C pendant une période d'une durée identique au traitement thermique. Une fois de plus, ce type de cure nécessaire pour éviter le développement de RSI conduit (malgré une formulation identique) à la fabrication de matériaux de microstructure différente.

1.2.2 Caractérisation des effets de la RSI à l'échelle du matériau : essais sur éprouvettes

La réalisation d'essais à l'échelle du matériau (i.e. sur des corps d'épreuve dont le volume est suffisamment petit pour qu'on puisse considérer l'état de contrainte et les variables internes comme homogènes) permet de comprendre les mécanismes d'action d'une pathologie telle que la RSI. Ce type d'expérimentation permet de quantifier les couplages pouvant affecter le développement des expansions (humidité, contraintes, température...), de caractériser les propriétés des matériaux (utilisation de volumes élémentaires représentatifs, le béton étant un matériau composite et donc hétérogène) mais également de disposer de données d'entrée pour la validation de méthodes de re-calculation.

(courbes de gonflement libre par exemple pour le modèle développé par [Baghdadi 2008]). Cette section décrit les essais mis en œuvre à cette échelle dans le cadre de nos travaux.

1.2.2.1 Quantification des couplages entre humidité et gonflements

1.2.2.1.1 Essais de gonflement libre

1.2.2.1.1.1 Cas des formules NR, R1 et R2

Description des corps d'épreuve :

Dans ces essais, les corps d'épreuve, appelés également éprouvettes de gonflement libre, ont pour objectif de caractériser l'influence de l'humidité sur l'amplitude et la cinétique des gonflements de RSI. Il s'agit de cylindres 11-22 ($\varnothing = 11$ cm, H = 22 cm) obtenus par carottage dans des blocs (28x28x22,5 cm). Les corps d'épreuve sont placés au cours des essais dans différentes conditions d'exposition à l'humidité afin de quantifier les couplages entre ce paramètre et les gonflements de RSI.

L'utilisation d'éprouvettes carottées (par opposition aux éprouvettes moulées) a pour objectif d'obtenir une répartition homogène des granulats dans les corps d'épreuve (Sedran & de Larrard 1994) et ainsi éviter des effets de peau pour les phénomènes de RAG pilotés par la taille des granulats (Larive 1998, Multon 2004) ou pour ceux de RSI si on considère que le siège des gonflements est localisé (totalement ou partiellement) aux interfaces pâte-granat. Ceci permet également de reprendre le principe des essais d'expansion résiduelle sur carotte extraite d'un ouvrage (Fasseu 1997, Godart 2006, Multon et al. 2008). Dans ces essais, les cylindres 11-22 sont carottés dans des blocs de béton après 28 jours de cure sous trois couches d'aluminium autoadhésif constituant une protection vis-à-vis de la dessiccation (Toutlemonde & Le Maou 1996).

Conditions de conservation :

Les éprouvettes de gonflement libre sont soumises à différentes conditions hydriques successives (cf. Tableau 2-1). Le changement des conditions hydriques pour chaque type d'éprouvette est réalisé lorsque la stabilisation des gonflements dans la première configuration est atteinte, i.e. après 538 jours d'exposition. La durée de la première phase d'exposition a été déterminée pour permettre aux matériaux d'atteindre un état hydrique stationnaire. La température de conservation est constante et égale à 38°C.

Tableau 2-1 : conditions de conservation des éprouvettes de gonflement libre

	Conditions de conservation avant équilibre (538 jours)	Conditions de conservation après équilibre
Groupe 1	Immersion	Séchage à 30 % HR
Groupe 2	100 % HR	Séchage à 30 % HR
Groupe 3	Scellement	Immersion
Groupe 4	Séchage à 30 % HR	Immersion

Données collectées :

Les corps d'épreuve sont équipés de bases d'extensométrie à pointeaux (base de mesure 100 mm) sur trois génératrices disposées à 120° suivant une méthode similaire à

l'essai performantiel RSI (*Pavoine & Divet 2007*) ou aux essais d'expansion résiduelle (*Fasseu 1997, Pavoine & Divet 2009*). Un suivi des variations relatives de masse des éprouvettes par pesée est également réalisé. Afin d'obtenir des données statistiquement représentatives, quatre corps d'épreuve identiques sont fabriqués par formule de béton, échéance de carottage et condition de conservation soit 48 éprouvettes au total (3 formules de béton, 4 conditions de conservation, 4 corps d'épreuve par configuration).

Nomenclature :

La nomenclature définie pour ces corps d'épreuve est la suivante :

- Premier champ : formule de béton de l'éprouvette,
- Deuxième champ : conditions de conservation de l'éprouvette (S = scellée [3 couches d'aluminium autoadhésif], I = immergée, H30 = en séchage à 30 % HR, H100 = à 100 % HR),
- Troisième champ : type d'essai auquel est affectée l'éprouvette (GL = gonflement libre),
- Quatrième champ : échéance de carottage (en jours),
- Cinquième champ : numéro de repérage de l'éprouvette.

NR	-	I-H30	-	GL	-	28	-	1
R1		H100-H30						2
R2		S-I						3
		H30-I						4

Figure 2-1 : nomenclature des éprouvettes de gonflement libre

1.2.2.1.1.2 Cas des formules BT et R3

Pour ces essais, les méthodes de préparation des corps d'épreuve et les données collectées sont identiques au cas de la section 1.2.2.1.1.1. Comme pour les éprouvettes de gonflement libre NR, R1 et R2, différentes conditions de conservation sont considérées (cf. Tableau 2-2). Seules les conditions hydriques extrêmes ont été considérées (immersion et séchage – 16 éprouvettes au total) pour des questions de capacité de suivi simultané des mesures. Les corps d'épreuve sont conservés à une température constante de 38°C.

Tableau 2-2 : conditions de conservation des éprouvettes de gonflement libre

	Conditions de conservation avant équilibre (538 jours)	Conditions de conservation après équilibre
Groupe 1	Immersion	Séchage à 30 % HR
Groupe 2	Séchage à 30 % HR	Immersion

La nomenclature définie pour ces corps d'épreuve est la suivante :

- Premier champ : formule de béton de l'éprouvette,
- Deuxième champ : conditions de conservation de l'éprouvette (I = immergée, H30 = en séchage à 30 % HR),
- Troisième champ : type d'essai auquel est affectée l'éprouvette (GL = gonflement libre),
- Quatrième champ : échéance de carottage (en jours),
- Cinquième champ : numéro de repérage de l'éprouvette.

BT	–	I-H30	–	GL	–	28	–	1
R3		H30-I						2
								3
								4

Figure 2-2 : nomenclature des éprouvettes de gonflement libre BT et R3

1.2.2.1.2 Essais d'expansion résiduelle : influence de l'échéance de carottage

Description des essais et des corps d'épreuve :

Les essais d'expansion résiduelle font partie des outils très fréquemment mis en œuvre lors d'expertises d'ouvrages atteints de réaction(s) de gonflement(s) interne(s) (*Multon et al. 2008*). Ils permettent notamment d'estimer si les désordres liés à une réaction de gonflement interne sont susceptibles de s'accroître dans le futur ou si ceux-ci sont déjà stabilisés. Cet essai constitue une des principales données d'entrée de certaines méthodes de re-calcul (*Li et al. 2004, Baghdadi 2008*). Ainsi, des méthodes d'essai d'expansion résiduelle sur des carottes extraites d'ouvrages ont été mises au point parmi lesquelles (*Fasseu 1997*) pour la RAG et (*Pavoine & Divet 2009*) pour la RSI.

Ce programme expérimental prévoit une série d'expériences pour évaluer les effets de l'échéance de carottage sur le développement de gonflements. Lors des fabrications, on coule, pour chaque condition de conservation hydrique (immersion, 100 % HR, scellement aluminium et 30 % HR), un bloc identique à celui destiné aux carottages des corps d'épreuve de gonflement libre (réalisés à une échéance de 28 jours après coulage, cf. section 1.2.2.1.1). Ces blocs supplémentaires sont soumis à la même cure thermique. Les matériaux constitutifs des blocs destinés aux essais de gonflement libre (carottage à 28 jours) et des blocs destinés à l'étude des effets de l'âge de carottage (carottage à 90 jours – échéance à laquelle on a estimé au moment de la conception des essais que les gonflements se seraient développés de manière significative) présentent donc le même potentiel de gonflement. Durant toute la période de cure précédant le carottage des cylindres de gonflement libre, l'ensemble des blocs est conservé sous trois couches de scellement aluminium (soit jusqu'à 28 jours d'âge).

Lorsque les essais de gonflement libre sont débutés (point zéro des mesures dimensionnelles et massiques réalisé à 28 jours), on place chacun des quatre blocs surnuméraires destinés à l'étude de l'influence de l'échéance de carottage dans une des quatre conditions de conservation. Ces blocs sont alors exposés à ces humidités différentes jusqu'à l'âge de 90 jours (soit durant 62 jours), période au cours de laquelle les matériaux vont développer suivant les cas les réactions pathogènes souhaitées à des degrés plus ou moins importants.

On réalise en parallèle le suivi dimensionnel des corps d'épreuve de gonflement libre carottés à 28 jours. Une fois l'âge de 90 jours atteint, on réalise alors quatre carottages dans chaque bloc restant : cette étape constitue le début de l'essai d'expansion résiduelle. Chaque corps d'épreuve ainsi obtenu est instrumenté à l'aide de bases de mesure pour extensométrie à pointeaux puis replacé dans les conditions de conservation de son bloc d'origine. Ainsi, par exemple, les carottes issues d'un bloc conservé à 100 % HR durant 62 jours sont replacées à 100 % HR. On réalise alors les suivis dimensionnels et massiques de ces éprouvettes puis on les compare aux résultats des essais de gonflement libre : ceci permet d'évaluer si l'avancement de la réaction est plus ou moins conséquent dans le cas des essais d'expansion résiduelle et d'estimer si la valeur finale des gonflements obtenus

est plus ou moins importante que celle qu'on obtient par les essais de gonflement libre (cf. Figure 2-3).

Le mode de préparation des éprouvettes est identique à celui des essais de gonflement libre (carottage parallèlement au sens de coulage de cylindres 11-22 dans des blocs de dimensions 28x28x25,5 cm). Ces essais ne sont réalisés que pour les matériaux NR, R1 et R2.

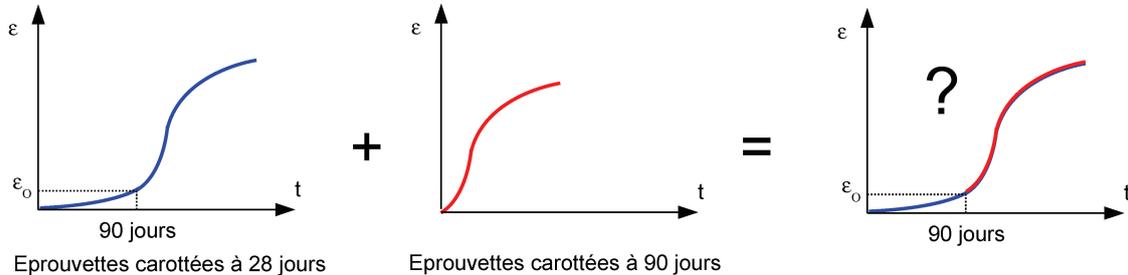


Figure 2-3 : principe d'évaluation des effets de l'âge du carottage

Conditions de conservation :

Les corps d'épreuve sont conservés dans des conditions hydriques de même nature que pour les essais de gonflement libre (cf. Tableau 2-1). Une fois de plus, un basculement des conditions d'exposition est prévu : celui-ci est réalisé au même moment que pour les éprouvettes de gonflement libre, soit 476 jours après carottage (âge des matériaux carottés à 28 jours et 90 jours égal à 566 jours). La température de stockage est constante et égale à 38°C afin de pouvoir comparer les résultats de suivi aux essais de gonflement libre.

Données collectées :

Comme pour les éprouvettes de gonflement libre, un suivi dimensionnel (extensométrie à pointeaux) et massique (pesée) est prévu pour l'ensemble de ces corps d'épreuve. Pour chaque cas de figure, 4 éprouvettes identiques sont préparées soit un total de 48 éprouvettes (3 formules de béton, 4 conditions de conservation, 4 corps d'épreuve par configuration).

Nomenclature :

La nomenclature définie pour ces corps d'épreuve est la suivante :

- Premier champ : formule de béton de l'éprouvette,
- Deuxième champ : conditions de conservation de l'éprouvette (S = scellée [3 couches d'aluminium autoadhésif], I = immergée, H30 = en séchage à 30 % HR, H100 = à 100 % HR),
- Troisième champ : type d'essai auquel est affectée l'éprouvette (GL = gonflement libre),
- Quatrième champ : échéance de carottage (en jours),
- Cinquième champ : numéro de repérage de l'éprouvette.

NR	-	I-H30	-	GL	-	90	-	1
R1		H100-H30						2
R2		S-I						3
		H30-I						4

Figure 2-4 : nomenclature des éprouvettes d'expansion résiduelle

le produit de solubilité de l'ettringite. En revanche, une augmentation de la température semble a priori plus favorable au développement d'une RAG sous l'effet de la thermoactivation de la réaction (*Larive 1998*). Par ailleurs, (*Baghdadi et al. 2008*) ont mis en évidence que l'augmentation de la température de stockage de 20°C à 38°C pour des corps d'épreuve fabriqués avec un béton proche de R1 induit une diminution du temps de latence de la réaction et une diminution des amplitudes de déformation de RSI (pouvant s'expliquer notamment par l'augmentation de la solubilité de l'ettringite avec l'augmentation de la température). Ainsi, lors du couplage de RSI et de RAG, la température de stockage peut avoir une influence déterminante sur les phénomènes observés macroscopiquement. Pour évaluer les effets de ce paramètre sur des phénomènes couplés de RAG et de RSI pour lesquels une variation de température peut induire une inversion de cinétique d'une réaction relativement à l'autre, une série d'éprouvettes de gonflement libre est prévue. Ces données ont pour objectif de compléter celles déjà disponibles dans (*Baghdadi et al. 2008-b*).

Les corps d'épreuve de ces essais sont fabriqués suivant le protocole décrit en section 1.2.2.1.1 et font l'objet d'un suivi dimensionnel et massique identique. Les éprouvettes sont conservées soit en immersion, soit à 100 % HR à une température de 20°C. Pour chaque configuration, quatre éprouvettes identiques sont préparées.

La nomenclature employée pour ces corps d'épreuve est la suivante :

- Premier champ : formule de béton de l'éprouvette,
- Deuxième champ : conditions de conservation de l'éprouvette (I = immergée, H100 = 100 % HR),
- Troisième champ : type d'essai auquel est affectée l'éprouvette (GL20 = gonflement libre à 20°C),
- Quatrième champ : échéance de carottage (en jours),
- Cinquième champ : numéro de repérage de l'éprouvette.

R2	_	I	_	GL20	_	28	_	1
		H100						2
								3
								4

Figure 2-6 : nomenclature des éprouvettes de gonflement libre R2 conservées à 20°C

1.2.2.2 Quantification des couplages entre contraintes et gonflements

L'application de contraintes à un matériau susceptible de gonflements peut induire une anisotropie dans le cas d'une RAG (*Larive 1998, Multon & Toutlemonde 2006*). (*Baghdadi 2008*) introduit dans sa modélisation macroscopique des effets mécaniques de la RSI à l'échelle de la structure une loi de couplage entre état de contrainte et gonflements calée sur les comportements avérés dans le cas de la RAG. Il convient donc de disposer de données expérimentales permettant de quantifier l'anisotropie induite par l'application d'un champ de contrainte et de valider, affiner ou d'infirmer les lois de couplages déjà mises au point. Une partie du programme expérimental mis en œuvre dans nos travaux ambitionne d'apporter des éléments de réponse à ces questions.

Description des corps d'épreuve :

Les corps d'épreuve correspondant à ces essais sont appelés éprouvettes de gonflement sous contraintes. Ils ont pour objectif de quantifier l'influence d'un état de contrainte sur les gonflements de RSI. Les éprouvettes sont des cylindres ($\varnothing = 13$ cm, $H = 24$ cm) moulés auxquels sont appliqués des états de contrainte radiale et/ou axiale en utilisant respectivement des bâtis de fluage et/ou des anneaux d'étreinte en acier.

Conditions de conservation :

Quatre groupes d'éprouvettes sont à considérer en fonction des cas de charge mis en œuvre (cf. Tableau 2-3). Les éprouvettes sont conservées sous scellement étanche durant la totalité du programme expérimental.

Tableau 2-3 : Cas de chargement pour éprouvettes de gonflement sous contraintes

Direction de chargement	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Groupe 4
Axiale	0	15 MPa	0	15 MPa
Etreinte radiale	0	0	Anneaux 4 mm	Anneaux 4 mm

Données collectées :

Pour l'ensemble des corps d'épreuve, des mesures de déformations axiales et radiales sont effectuées à l'aide de robots de mesure dimensionnelle spécialement développés pour ce type d'expérimentations (*Multon 2004*). En parallèle, un suivi des variations relatives de masse des éprouvettes non chargées axialement est réalisé (les éprouvettes en bâtis de fluage ne peuvent être pesées du fait du dispositif de chargement utilisé). Afin d'obtenir des données statistiquement représentatives, quatre corps d'épreuve sont fabriqués par formule de béton et cas de chargement soit 48 éprouvettes au total.

Nomenclature :

La nomenclature définie pour ces corps d'épreuve est la suivante :

- Premier champ : formule de béton de l'éprouvette,
- Deuxième champ : cas de chargement (L = chargement axial, T = étreinte radiale, la valeur numérique correspond au chargement axial en MPa ou à l'épaisseur de l'anneau d'étreinte radiale en mm),
- Troisième champ : type d'essai auquel est affectée l'éprouvette (SC = sous contrainte),
- Quatrième champ : numéro de repérage de l'éprouvette.

NR	-	L0T0	-	SC	-	1
R1		L15T0				2
R2		L0T4				3
		L15T4				4

Figure 2-7 : nomenclature des éprouvettes de gonflement sous contraintes

1.2.2.3 Suivi des performances mécaniques

Description des corps d'épreuve :

Afin de suivre l'évolution des performances mécaniques des différents bétons formulés, des éprouvettes de caractérisation mécanique sont confectionnées. Il s'agit de cylindres 11-22 moulés testés sous une presse à béton.

Conditions de conservation :

Deux conditions de conservation sont mises en œuvre : une partie des éprouvettes est conservée sous scellement aluminium étanche et une autre partie est conservée immergée dans un bac d'eau identique à ceux décrits en section 2.3.2.1.4. Les deux groupes d'éprouvettes sont testés respectivement à 28, 90, 180 jours, un an et en fin de programme expérimental (d'une durée de l'ordre de 28 mois) dans le cas du scellement aluminium, et à 28 jours et en fin de programme expérimental dans le cas de l'immersion.

Données collectées :

A chaque échéance et pour chaque condition de conservation, on réalise des essais mécaniques afin de déterminer les résistances en compression et en traction par fendage, le module d'Young (*Torrenti et al. 1999-a, Toutlemonde 1999*) et le coefficient de Poisson. Afin de collecter des données statistiquement représentatives, six éprouvettes sont testées à chaque échéance, pour chaque condition de conservation et chaque formule de béton (trois éprouvettes en compression + module + coefficient de Poisson et trois en traction) soit 126 éprouvettes pour l'ensemble du programme.

Les éprouvettes testées en fin de programme (conservées en eau ou sous aluminium) sont équipées de bases d'extensométrie (pour extensomètre à pointeaux) afin de suivre l'évolution des gonflements sur des éprouvettes moulées, données à confronter aux résultats issus des éprouvettes de gonflement libre correspondantes afin d'évaluer l'impact du carottage sur les mesures dimensionnelles. Un suivi massique de ces corps d'épreuve est réalisé en parallèle.

Nomenclature :

La nomenclature définie pour ces corps d'épreuve est la suivante :

- Premier champ : formule de béton de l'éprouvette,
- Deuxième champ : condition de conservation de l'éprouvette (S = scellée, I = immergée),
- Troisième champ : type d'essai auquel est affectée l'éprouvette (C = compression, F = fendage),
- Quatrième champ : échéance de l'essai,
- Cinquième champ : numéro de repérage de l'éprouvette (1, 2 et 3 pour les essais de compression ; 4, 5 et 6 pour les essais de fendage).

NR	-	S	-	C	-	28	-	1
R1		I		F		90		2
R2						180		3
						1a		4
						2a		5
								6

Figure 2-8 : nomenclature des éprouvettes de caractérisation mécanique

1.2.2.4 Caractérisation de la lixiviation des alcalins

Que ce soit au jeune âge ou durant la « vie » d'un matériau, la présence d'alcalins se révèle être un élément déterminant vis-à-vis du risque de RSI. L'étude bibliographique du Chapitre 1 a notamment montré que la présence d'alcalins durant la phase de cure thermique modifie les domaines de stabilité des différents hydrates et peut faciliter l'adsorption des sulfates par les CSH. Lors de la phase de stockage, une diminution de la teneur en alcalins peut quant à elle faciliter la désorption des sulfates mobilisés par les silicates de calcium hydratés et ainsi induire une accélération des gonflements. Ainsi, afin d'évaluer l'ampleur des phénomènes de lixiviation lors des différentes phases du programme expérimental, différents essais ont été mis au point.

1.2.2.4.1 Phase de cure thermique

La cure thermique des corps d'épreuve est réalisée dans un bain d'eau (cf. section 2.2.2.1). Ainsi, il existe un risque de lixiviation des alcalins durant cette étape des expérimentations pouvant conduire à une diminution des amplitudes de gonflement et/ou à une diminution du temps de latence des expansions.

Afin de quantifier le phénomène de lixiviation imputable à la cure thermique, une éprouvette spécifique est fabriquée à chaque coulage de corps d'épreuve. Il s'agit d'un cylindre moulé de 11 cm de diamètre et de 22 cm de hauteur protégé contre la lixiviation de la même façon que les corps d'épreuve auxquels il est rattaché. La lixiviation des alcalins est évaluée par dosage de ces espèces en surface et à cœur des corps d'épreuve.

Le prélèvement de surface est une tranche de 2 cm d'épaisseur obtenue par découpe de l'éprouvette. Le prélèvement à cœur est un cube de 5 cm de côté prélevé au centre de l'éprouvette. Chaque échantillon est ensuite broyé et concassé jusqu'à obtenir une poudre dont les particules ont un diamètre inférieur à 315 μm . Les alcalins sont dosés après une attaque à l'acide nitrique dilué au 1/50^{ième} par spectrométrie d'émission atomique. Les valeurs obtenues sont estimées représentatives à $\pm 0,1$ %.

La nomenclature mise en œuvre pour ces corps d'épreuve est la suivante :

- Premier champ : formule de béton de l'éprouvette,
- Deuxième champ : conditions de conservation de l'éprouvette lors de la cure thermique (T = textile de cure),
- Troisième champ : type d'essai auquel est affectée l'éprouvette (L = caractérisation de la lixiviation),
- Quatrième champ : type de corps d'épreuve fabriqué lors du coulage correspondant à l'éprouvette (GL + M = blocs pour carottage de cylindres de gonflement libre et éprouvettes de caractérisation mécanique, SC =

éprouvettes de gonflement sous contraintes, Pi = poutre n°i, L = éprouvettes de caractérisation de la lixiviation en phase de stockage).

NR	_	T	_	L	_	GL+M
R1						SC
R2						Pi
						L

Figure 2-9 : nomenclature des éprouvettes de caractérisation de la lixiviation des alcalins en phase de cure thermique

1.2.2.4.2 Phase de suivi des corps d'épreuve

Les essais de gonflement libre sont réalisés dans différentes conditions hydriques. L'étude bibliographique du Chapitre 1 a montré que la lixiviation des alcalins est d'autant plus importante que l'humidité environnante est élevée (*Graf 2007*). De même, (*Famy et al. 2001*) observent une lixiviation importante des alcalins contenus dans des mortiers pour des humidités élevées. Devant les effets marqués de ces espèces chimiques sur les cinétiques et les amplitudes de gonflement, il apparaît important de quantifier les départs d'alcalins lors du suivi dimensionnel des corps d'épreuve en phase de stockage, la lixiviation étant attendue beaucoup plus importante dans le cas d'une immersion que dans celui d'une conservation en atmosphère saturée.

La lixiviation des alcalins est caractérisée sur des cylindres 11-22 moulés. Pour chaque cas de lixiviation étudié, quatre éprouvettes identiques sont fabriquées dont une fait l'objet d'un suivi dimensionnel (extensométrie à pointeaux) et massique (pesée). Après avoir réalisé un dosage de la teneur initiale en alcalins avant lancement des expérimentations, on prélève régulièrement un cylindre pour caractériser l'évolution de la teneur en sodium et en potassium. Les instants de prélèvement sont déterminés par les évolutions dimensionnelles du matériau (un prélèvement initial [1], un prélèvement lors de l'initialisation des gonflements [2], un prélèvement à l'issue des gonflements intenses [3] et un prélèvement en phase asymptotique [4], cf. Figure 2-10).

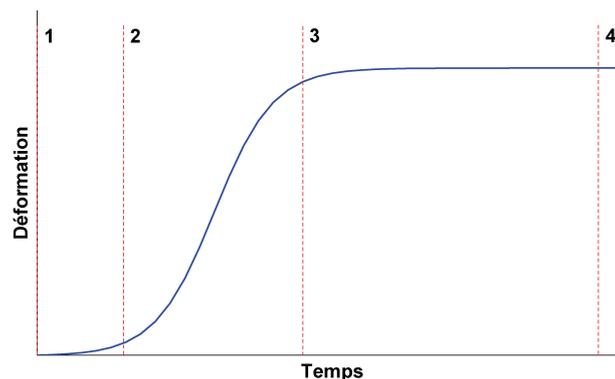


Figure 2-10 ; prélèvements des éprouvettes pour caractérisation de la lixiviation

On évalue le départ d'alcalins à cœur par dosage des espèces contenues dans une tranche de 5 cm d'épaisseur découpée dans la partie centrale d'un demi cylindre obtenu par fendage (cf. Figure 2-11). La méthode de broyage et de dosage des échantillons est identique à celle présentée en section 1.2.2.4.1. La lixiviation est caractérisée au cours du

temps en comparant le dosage effectué à une date t au dosage effectué à l'issue du traitement thermique.

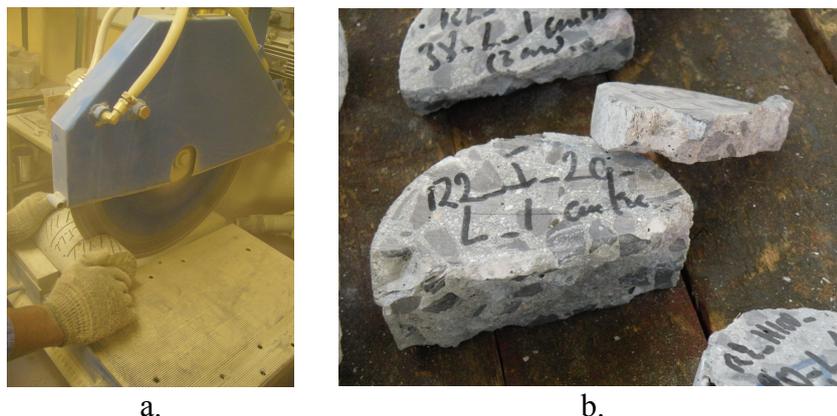


Figure 2-11 : préparation des échantillons pour caractérisation de la lixiviation des alcalins en phase de stockage (a. découpe d'une demi cylindre moulé pour prélèvement de la partie centrale ; b. échantillon avant broyage – à gauche, échantillon central = cœur – à droite, échantillon de surface)

La nomenclature mise en œuvre pour ces corps d'épreuve est la suivante :

- Premier champ : formule de béton de l'éprouvette,
- Deuxième champ : conditions de conservation de l'éprouvette (I = immersion, H100 = 100 % HR),
- Troisième champ : température de conservation (38 = 38°C, 20 = 20°C),
- Quatrième champ : type d'essai auquel est affectée l'éprouvette (L = caractérisation de la lixiviation),
- Cinquième champ : numéro de repérage de l'éprouvette.

R1	-	I	-	38	-	L	-	1
R2		H100		20				2
								3
								4

Figure 2-12 : nomenclature des éprouvettes de caractérisation de la lixiviation des alcalins en phase de stockage

1.2.3 Caractérisation des effets mécaniques de la RSI à l'échelle de la structure : essais sur poutres

1.2.3.1 Description des corps d'épreuve

Afin de disposer de données sur structures simples pour valider une méthode de recalcul, le principe de poutres armées ou non soumises à des conditions d'exposition à l'humidité variables est repris des travaux de (Multon 2004). Le programme expérimental comprend six poutres de dimensions 0,25x0,50x3,00 m décrites dans le Tableau 2-4. Ces poutres sont positionnées sur des appuis glissants (cf. Figure 2-13). La portée des structures est de 2,80 m. La ligne d'appui des structures est située à mi-hauteur (barres d'appui noyées dans les structures au moment du coulage). On trouvera en Annexe 1 les plans de ferrailage correspondant aux renforcements A et FA.

Ce choix de géométrie de corps d'épreuve a pour objectif de nous permettre de collecter des données permettant de vérifier (ou non) la validité des hypothèses de la

théorie de la RdM dans le cas des structures atteintes de RSI. Dans ce contexte, la poutre représente une des géométries les plus simples. Par rapport à une dalle, ce type de corps d'épreuve permet une interprétation des résultats simplifiée (fonctionnement monodimensionnel dans le cadre de nos essais). De plus, en termes de pratiques expérimentales, des poutres sont plus facilement manipulables que des dalles.



Figure 2-13 : dispositifs d'appui des poutres (a. barres d'appui après décoffrage ; b. poutre en position sur ses appuis glissants)

Tableau 2-4 : typologie des poutres testées

Désignation	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Formule de béton	NR	R1	R1	R1	R2	R2
Renforcement	NA	NA	A	FA	NA	FA

(NA = Non Armé ; A = faiblement Armé ; FA = Fortement Armé)

1.2.3.2 Conditions de conservation

Les poutres sont soumises à des conditions d'exposition à l'humidité variables au cours du temps. Dans un premier temps, on crée dans la structure un gradient de séchage vertical important ayant pour but de favoriser les gonflements en partie basse des structures. Pour cela, les 7 cm inférieurs des poutres sont immergés dans l'eau. La face supérieure est exposée à une atmosphère à 30 % HR. Les faces latérales sont protégées de la dessiccation sur les 43 cm supérieurs grâce à un scellement constitué de trois couches d'aluminium autoadhésif (*Toutlemonde & Le Maou 1996*). Dans un second temps, on réalise un remouillage de la face supérieure pour évaluer les effets d'une humidification tardive (cf. Figure 2-14). La température de stockage est de 38°C.

Le retour d'expérience des expertises sur ouvrages montre que les effets des expansions empêchées ou différentielles peuvent se révéler tout aussi délétères que les expansions en elles-mêmes. L'application d'un gradient hydrique a pour objectif de générer de tels phénomènes expansifs afin de caractériser, de manière cohérente avec le fonctionnement d'ouvrages réels, les effets structurels de la RSI.

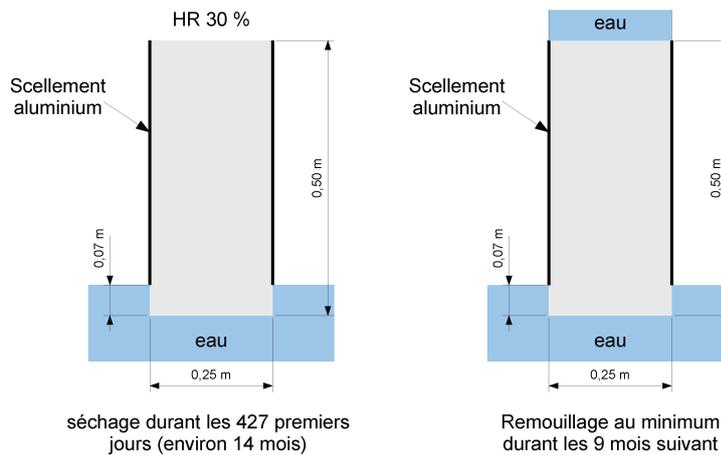


Figure 2-14 : conditions de conservation des poutres au cours du temps (vue en coupe)

1.2.3.3 Données collectées

L'objectif de ces essais est d'améliorer la compréhension quantitative du fonctionnement de structures atteintes de RSI. Les conditions d'exposition des structures de ce programme conduisent au développement de gradients hydriques aboutissant à l'apparition de gradients de gonflement. Ceci se traduit expérimentalement par une mise en flexion des corps d'épreuve sous l'effet des déformations chimiques imposées par les réactions de gonflement. Il apparaît ainsi nécessaire de réaliser un suivi hydrique des poutres en parallèle du suivi dimensionnel. L'objectif final est ainsi de tenir compte du couplage local entre l'humidité et le développement des expansions pour analyser le fonctionnement mécanique global des structures atteintes. Cette section décrit les données collectées dans ce contexte.

1.2.3.3.1 Suivi mécanique

Les déformations des corps d'épreuves sont suivies dans le temps (interrogation des dispositifs d'instrumentation toutes les 15 minutes), de manière locale et globale dans les trois directions de l'espace. Les cages d'armature des poutres ferrées font également l'objet d'une instrumentation. L'objectif est de disposer de mesures en différents points représentatifs du fonctionnement des structures pour analyser finement leur comportement et constituant une base de données détaillée à confronter aux prédictions des méthodes de re-calcul. On trouvera en Annexe 1 les plans d'instrumentation détaillés correspondants.

D'une manière générale, on réalise un suivi des déformations locales dans les trois directions de l'espace à l'aide de jauges d'extensométrie noyées dans le béton au moment de la fabrication des corps d'épreuve. Les mesures sont effectuées à quatre profondeurs différentes (0,08 m, 0,17 m, 0,27 m et 0,37 m) afin de caractériser l'effet du gradient d'humidité sur le comportement structurel des poutres.

Un suivi des déformations globales est également mis en œuvre à l'aide de capteurs de grande base (LVDT ou extensomètres à cordes vibrantes). Dans la direction longitudinale, trois profondeurs de mesure différentes sont considérées (0,03 m, 0,23 m et 0,47 m). Ces mesures conduisent à intégrer les effets de la fissuration des corps d'épreuve ce qui ne peut être réalisé à l'aide des jauges noyées. Verticalement et transversalement, trois positions de mesure des déformations sont également prévues. Les mesures sont effectuées sur chaque face à l'aide d'extensomètres à corde vibrante.

Enfin, un suivi de la déflexion des structures est opéré à l'aide de cinq capteurs de déplacement par face disposés symétriquement par rapport à la section médiane.

La qualification métrologique de ces moyens de mesure est proposée en section 2.3.

En fin de vie (i.e. à l'issue des deux phases décrites par la Figure 2-14 où on espère avoir observé des mécanismes relativement stabilisés), toutes les poutres seront testées par un essai mécanique en flexion quatre points à rupture (portée 2,75 m, zone de moment constant de 0,40 m). Cette étape n'a pas été atteinte à la date de rédaction du présent mémoire.

1.2.3.3.2 Suivi hydrique

La teneur en eau d'un matériau est un paramètre déterminant quant au développement de la RSI. Ainsi, il est primordial de pouvoir évaluer de manière précise les mouvements d'eau dans les poutres tout au long du programme expérimental. Différents moyens sont mis en œuvre pour cela :

- Mesure d'humidité relative :

Des capteurs d'humidité relative noyés (cf. plan d'instrumentation en Annexe 1) doivent permettre d'évaluer la progression du front de séchage puis d'humidification dans les poutres tout au long du programme expérimental ;

- Mesure de la teneur locale en eau par gammadensimétrie :

L'utilisation du banc de gammadensimétrie automatisé développé dans le cadre de l'étude de (*Multon 2004*) doit permettre de quantifier localement des variations relatives de masse en partie haute des poutres tout au long du programme expérimental. Ce dispositif permet un suivi de la teneur en eau locale des poutres en trois sections différentes (0,7 m, 1,4 m, et 2,4 m de l'about sud de la poutre – les résultats présentés correspondent à une moyenne des résultats obtenus pour chaque section) en des profondeurs variant de 10 mm à 290 mm avec un pas de 20 mm (cf. Annexe 1) ;

- Mesure de la teneur en eau globale par pesée :

L'utilisation du banc de pesée développé pour (*Multon 2004*) permet de réaliser un suivi de la teneur globale en eau des poutres (en supposant que les seules variations de masse des corps d'épreuve sont imputables aux échanges d'eau avec le milieu environnant). Les données issues de ces mesures, couplées à celles fournies par l'utilisation du banc de gammadensimétrie, permettent d'évaluer les mouvements des fronts d'imbibition et de séchage dans les poutres (*Multon et al. 2004, Multon & Toutlemonde 2004 et Multon 2004*).

1.2.3.3.3 Suivi thermique

Les corps d'épreuve sont soumis à une cure thermique après coulage afin de favoriser le développement de la RSI. A la lumière de l'étude bibliographique du Chapitre 1, la température du matériau au jeune âge et son maintien se révèlent être des paramètres critiques pour l'évaluation des gonflements finaux qu'il convient donc de contrôler. Ainsi, le champ de température développé dans les corps d'épreuve lors de la cure thermique est mesuré à l'aide de capteurs de température noyés (cf. plan d'instrumentation en Annexe 1).

1.2.3.4 Echéance de démarrage des essais

Le Tableau 2-5 synthétise les échéances de mise en eau des corps d'épreuve. La variabilité de celle-ci provient des différentes difficultés rencontrées durant l'instrumentation des corps d'épreuve ayant nécessité des mises au point plus ou moins conséquentes.

Tableau 2-5 : échéance de mise en eau des poutres

	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Age à la mise en eau (jours)	62	62	69	67	69	81

1.2.4 Synthèse

Au total, le programme expérimental comprend la fabrication de 6 poutres et d'environ 330 éprouvettes. Le Tableau 2-6, le Tableau 2-7 et le Tableau 2-8 synthétisent la nomenclature des différents essais sur éprouvettes. La Figure 2-15 donne une représentation schématique de l'agencement des essais.

Pour des questions organisationnelles, les fabrications de certains corps d'épreuve ont été regroupées, principalement de la façon suivante :

- Eprouvettes de gonflement libre, d'expansion résiduelle et de caractérisation mécanique ;
- Eprouvettes de gonflement sous contraintes ;
- Poutres.

Tableau 2-6 : tableau récapitulatif de la nomenclature des corps d'épreuve (n°1)

Formule de béton	Conditions de conservation	Type d'essai	Échéances	Numérotation des éprouvettes
Eprouvettes de gonflement libre				
NR	I-H30	GL	28	1
R1	H100-H30			2
R2	S-I			3
	H30-I			4
BT	I-H30	GL	28	1
R3	H30-I			2
				3
				4
R2	I	GLA	28	1
				2
				3
				4
R2	I	GL20	28	1
	H100			2
				3
				4

Tableau 2-7 : tableau récapitulatif de la nomenclature des corps d'épreuve (n°2)

Formule de béton	Conditions de conservation	Type d'essai	Échéances	Numérotation des éprouvettes
Eprouvette de quantification de lixiviation des alcalins (cure)				
NR	T	L		Pi
R1				GL+M
R2				SC
				L
Eprouvette de quantification de lixiviation des alcalins stockage				
Formule de béton	Conditions de conservation	Type d'essai	Échéances	Numérotation des éprouvettes
R1	I	38	L	1
R2	H100	20		2
				3
				4

Tableau 2-8 : tableau récapitulatif de la nomenclature des corps d'épreuve (n°3)

Formule de béton	Conditions de conservation	Type d'essai	Échéances	Numérotation des éprouvettes
Eprouvettes d'expansion résiduelle				
NR	I-H30	GL	90	1
R1	H100-H30			2
R2	S-I			3
	H30-I			4
Eprouvettes de caractérisation mécanique				
NR	S	C	28	1
R1	I	F	90	2
R2			180	3
			1a	4
			2a	5
				6
Eprouvettes de gonflement sous contraintes				
NR	L0T0	SC		1
R1	L15T0			2
R2	L0T4			3
	L15T4			4

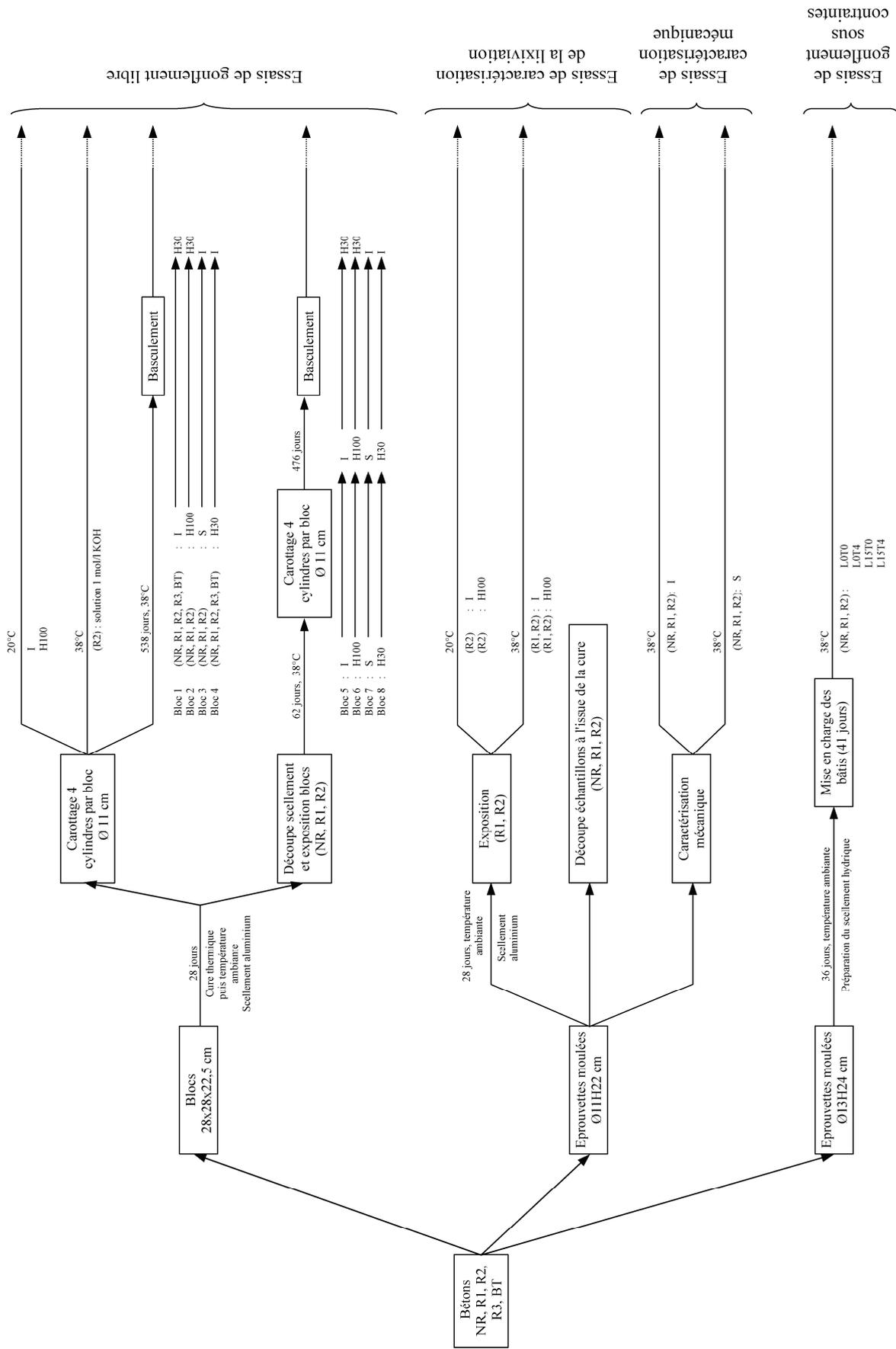


Figure 2-15 : représentation schématique des essais

2 Mises au point, qualification et méthodes

2.1 Matériaux

2.1.1 Formulation des matériaux

2.1.1.1 Cahier des charges

2.1.1.1.1 Performances visées

On rappelle les objectifs de formulation des bétons :

- Formule NR : formule de béton pas ou peu réactive vis-à-vis de la RSI ;
- Formule R1 : formule de béton (très) réactive vis-à-vis de la RSI ;
- Formule R2 : formule réactive vis-à-vis de la RSI et de la RAG.

L'objectif pour cette étude est de disposer de trois bétons de réactivités différentes vis-à-vis de la RSI mais dont les squelettes granulaires, les rapports E/C et les teneurs en ciment sont équivalents. On cherche ainsi à obtenir des bétons similaires en termes de résistances et de porosité afin de faciliter les comparaisons des résultats issus des différentes expérimentations.

Les bétons formulés doivent être représentatifs de bétons mis en œuvre pour des ouvrages d'art atteints de RSI. On cherche donc à formuler des matériaux dont la résistance cible est de l'ordre de 40 MPa avec un rapport E/C voisin de 0,50. La maniabilité visée pour les matériaux frais est de 10 ± 2 cm pour assurer un remplissage efficace des coffrages et une bonne homogénéité du matériau après vibration. Le dosage en ciment pour les trois bétons est fixé à 410 kg/m^3 et la teneur minimale en $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ est fixée à 1 % de la masse de ciment (soit $4,1 \text{ kg de Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3$) pour les bétons réactifs. En outre, aucun adjuvant n'est utilisé afin de limiter les interactions chimiques pouvant rendre difficile l'interprétation des résultats.

2.1.1.1.2 Constituants

2.1.1.1.2.1 Ciments

Pour cette étude, on dispose de deux ciments dont la composition est donnée dans le Tableau 2-9. L'utilisation de l'un ou de l'autre doit permettre de modifier la réactivité d'un béton donné vis-à-vis de la RSI :

- Ciment_NR : ciment présumé ne pas favoriser la RSI en l'absence d'échauffement excessif, à cause de ses faibles teneurs en alcalins, en C_3A et en sulfates ;
- Ciment_R : ciment susceptible de favoriser le développement de RSI dans le cas de pièces critiques fabriquées sans précautions à cause de ses plus fortes teneurs en alcalins (nécessitant toutefois un dopage en $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ pour atteindre la cible de 1 % de la masse de ciment – dopage effectué avec KOH), en C_3A et en sulfates.

Les écarts significatifs notés entre les analyses fournies par la fiche technique des ciments et celles réalisées au LCPC peuvent s'expliquer par la variabilité des

caractéristiques des ciments produits au cours du temps. Les données des cimentiers ne sont pas accompagnées de données caractérisant la dispersion des analyses, rendant ainsi délicate la justification de ces observations.

Ces ciments ont été approvisionnés chacun à partir d'un lot unique. Ils ont été conditionnés en sacs étanches pour une meilleure conservation tout au long de l'étude. On trouvera en Annexe 2 leur composition chimique détaillée.

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)

	Provenance analyse	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CSH ₂	CC	Na ₂ O _{eq}	SO ₃
Ciment_NR	cimentier	61,60%	14,90%	2,50%	12,90%	5,70%	0,20%	0,28%	2,63%
	LCPC	43,22%	32,16%	2,35%	11,63%	5,61%	3,80%	0,44%	2,61%
Ciment_R	cimentier	56,60%	13,80%	6,70%	12,80%	7,50%	0,00%	0,63%	3,50%
	LCPC	41,45%	27,15%	4,97%	11,54%	7,44%	4,18%	0,83%	3,46%

2.1.1.1.2.2 Granulats

Pour cette étude, on dispose de plusieurs types de granulats :

- Gravillon_NR : il s'agit de granulats siliceux non réactifs vis-à-vis de la RAG (deux coupures granulaires : 4/8 et 8/12 mm) ;
- Gravillon_PR : il s'agit de granulats calcaires de l'ère primaire potentiellement réactifs vis-à-vis de la RAG (trois coupures granulaires : 4/7,1, 7,1/10 et 10/14 mm) ;
- Sable_NR : il s'agit d'un sable siliceux non réactif vis-à-vis de la RAG (une seule coupure granulaire 0/2 mm).

Les granulats ont été approvisionnés secs afin d'assurer un meilleur contrôle de la fabrication des bétons. On trouvera en Annexe 2 des détails sur la granulométrie des matériaux.

2.1.1.2 Formulation

Les différentes réactivités des formules NR, R1 et R2 sont obtenues par combinaison des différents constituants à disposition :

- NR = Ciment_NR + Sable_NR + Gravillon_NR ;
- R1 = Ciment_R + Sable_NR + Gravillon_NR ;
- R2 = Ciment_R + Sable_NR + Gravillon_PR.

Par la suite, nous désignerons les combinaisons Sable_NR + Gravillon_NR et Sable_NR + Gravillon_PR respectivement par Mélange_NR et Mélange_PR.

Le Tableau 2-10 donne la composition des différents bétons. Un dopage en KOH est effectué pour atteindre une teneur en Na₂O_{eq} correspondant à 1 % de la masse de ciment pour les bétons R1 et R2. On trouvera en Annexe 2 le détail de l'optimisation de la formulation des matériaux. Les bétons BT et R3 ont des compositions respectivement identiques aux matériaux NR et R2 mais ne sont pas soumis à un traitement thermique au jeune âge.

Tableau 2-10 : formulation des bétons (kg/m³)

Constituants	NR	R1	R2
Ciment_NR	410,00	0,00	0,00
Ciment_R	0,00	410,00	410,00
Eau	199,07	199,04	199,20
Sable_NR 0/2	856,01	853,98	797,04
Gravillon_NR 4/8	100,25	100,01	0,00
Gravillon_NR 8/12	830,64	828,67	0,00
Gravillon_PR 4/7,1	0,00	0,00	114,30
Gravillon_PR 7,1/10	0,00	0,00	28,57
Gravillon_PR 10/14	0,00	0,00	842,96
KOH	0,000	1,745	1,745
E/C	0,46	0,46	0,46
G/S	1,09	1,09	1,24

2.1.2 Caractérisation exothermique

Une caractérisation expérimentale de l'exothermie des formules de béton a été effectuée à partir d'essais quasi-adiabatiques dits Q_{AB} (Torrenti 1996, Buyle-Bodin & Cussigh 2003, Martin & Toutlemonde 2010, Torrenti 2010). Ceux-ci permettent d'évaluer le dégagement de chaleur des matériaux en conditions adiabatiques et d'en déduire l'histoire des températures correspondante. Les résultats de ces essais sont représentés sur la Figure 2-16.

Conformément à nos attentes, les formules R1 et R2, utilisant un ciment beaucoup plus riche en C_3A que la formule NR, développent un échauffement plus rapide en conditions adiabatiques, créant ainsi des conditions thermiques favorables à l'initiation de RSI. Par ailleurs, la capacité calorifique massique des granulats calcaires étant plus élevée que celle des granulats siliceux (respectivement 0,84 et 0,73 J/K.g), le dégagement de chaleur de la formule R2 est légèrement moins important que celui de la formule R1. On remarque cependant que la quantité de chaleur totale dégagée par les trois formules est assez proche.

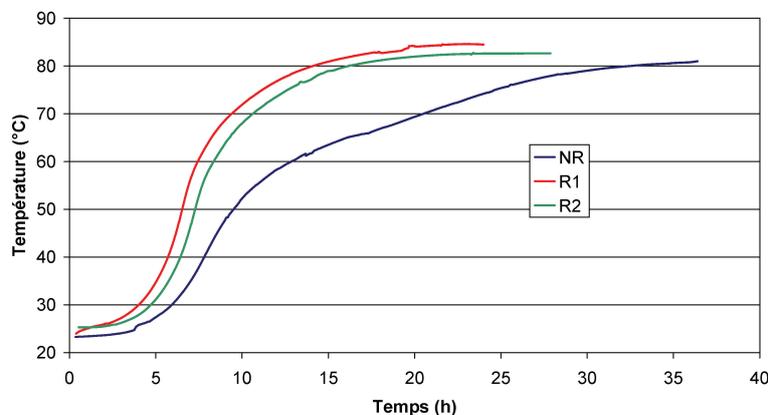


Figure 2-16 : caractérisation du comportement exothermique des matériaux par essai Q_{AB}

2.1.3 Caractérisation mécanique

2.1.3.1 Performances mécaniques

Afin de s'assurer que les matériaux mis au point satisfont le cahier des charges fixé en termes de performances mécaniques, des essais de caractérisation ont été effectués après cure thermique suivie d'une cure jusqu'à 28 jours d'âge soit en eau, soit sous scellement hydrique (*Toutlemonde & Le Maou 1996*) soit en eau à température ambiante. Les résultats de ces essais mécaniques sont consignés dans le Tableau 2-11 et le Tableau 2-12. Les matériaux formulés correspondent aux critères du cahier des charges.

Tableau 2-11 : caractérisation mécanique des matériaux à 28 jours (cure sous scellement hydrique)

	NR		R1		R2	
	Mesure	Ecart-type	Mesure	Ecart-type	Mesure	Ecart-type
Résistance en compression moyenne (MPa)	39,3	1,5	38,6	5,5	41,4	2,5
Résistance en traction moyenne (MPa)	4,5	0,4	5,0	0,0	4,6	0,6
Module d'Young moyen (MPa)	32800	1200	30800	3200	31500	800
Coefficient de Poisson	0,176	0,022	0,181	0,014	0,247	0,003

Tableau 2-12 : caractérisation mécanique des matériaux à 28 jours (cure en eau)

	NR		R1		R2	
	Mesure	Ecart-type	Mesure	Ecart-type	Mesure	Ecart-type
Résistance en compression moyenne (MPa)	39,7	0,8	36,8	3,0	40,0	0,8
Résistance en traction moyenne (MPa)	4,2	0,1	4,4	0,2	4,2	0,1
Module d'Young moyen (MPa)	31700	900	29600	900	29800	500
Coefficient de Poisson	0,156	0,003	0,154	0,011	0,225	0,004

2.1.3.2 Coefficient de dilatation thermique

Une détermination du coefficient de dilatation thermique entre 20°C et 38°C a été effectuée sur des cylindres 11-22. Pour les formules NR, R1 et R2, les résultats correspondent à une population de 22 corps d'épreuve. Pour les formules BT et R3, les résultats correspondent à une population de 8 éprouvettes. Les résultats des essais sont consignés dans le Tableau 2-13. On notera la différence significative estimée entre les bétons R2 et R3 utilisant pourtant les mêmes granulats. A la lumière de nos investigations, aucune explication pertinente n'a pu être avancée au moment de la rédaction de ce mémoire.

Tableau 2-13 : coefficients de dilatation thermique des matériaux (gamme 20-38°C)

	NR	R1	R2	R3	BT
Coefficient de dilatation moyen (°C ⁻¹)	1,12E-05	1,05E-05	7,33E-06	1,20E-05	1,15E-05
Ecart type (°C ⁻¹)	1E-06	1E-06	1,3E-06	1,4E-06	1,1E-06

2.1.3.3 Masse volumique

La masse volumique des matériaux NR, R1 et R2 a été déterminée à l'aide des éprouvettes de caractérisation mécanique à l'issue de la cure thermique (i.e. à l'issue d'une semaine d'immersion lors du traitement thermique mais avant toute exposition aux conditions expérimentales de suivi). Le Tableau 2-14 donne les résultats de cette détermination

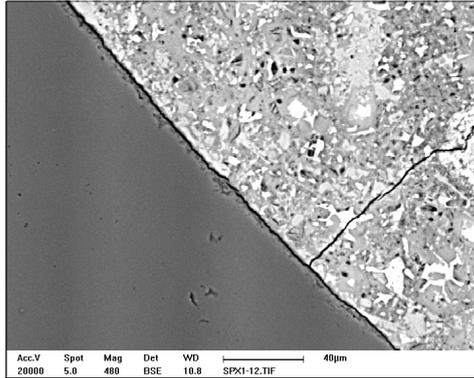
Tableau 2-14 : masse volumique des matériaux

	NR	R1	R2
Masse volumique (kg/m ³)	2328	2320	2363
Ecart type (kg/m ³)	22	11	33

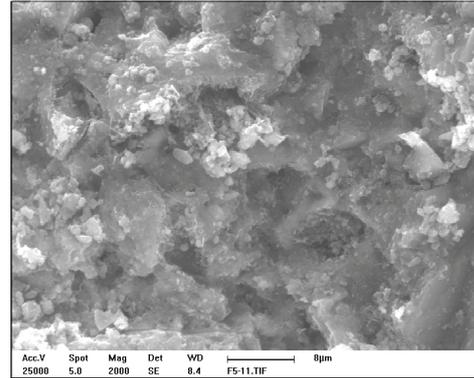
2.1.4 Caractérisation microscopique

A l'issue des essais de caractérisation mécanique à 28 jours, des observations microscopiques (MEB – Philips XL 30) ont été réalisées sur fractures fraîches et surfaces polies des bétons NR, R1 et R2. Les observations sur cassures fraîches sont assurées par la technique des électrons secondaires fournissant une information topographique (accélération 25 keV – métallisation au carbone). Les observations sur surfaces polies sont réalisées par la technique des électrons rétrodiffusés (images en contrastes de numéros atomiques) (accélération 20 keV), après imprégnation de résine, polissage micrométrique, et métallisation au carbone

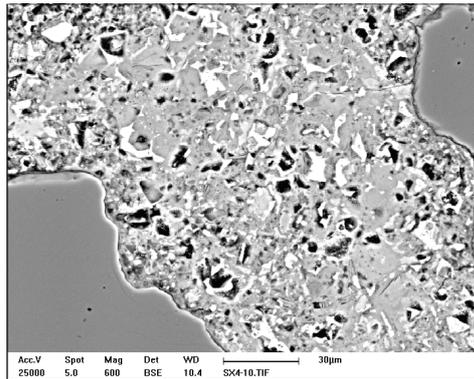
Ces observations confirment que les matériaux sont sains à l'issue de la cure thermique. Seules quelques traces d'ettringite sont relevées (Figure 2-17.e-f-g-h) et ne semblent pas symptomatiques de gonflements de RSI. Très peu de gels de RAG sont observés (présence de gels de manière localisée). D'un point de vue mécanique, les interfaces entre granulats et pâte semblent cohésives (cf. Figure 2-17.a). Les matériaux sont microporeux (Figure 2-17.b-c) et on y observe de nombreuses phases anhydres (Figure 2-17.d).



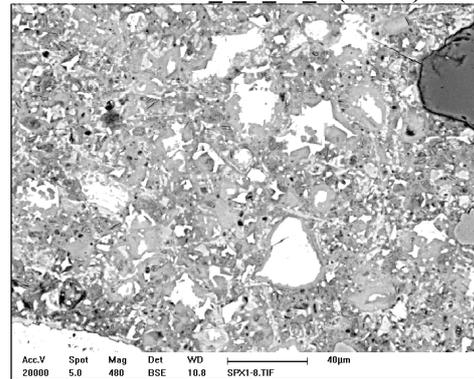
a. Interface pâte- granulat – R1_I_F_28_6 (x480)



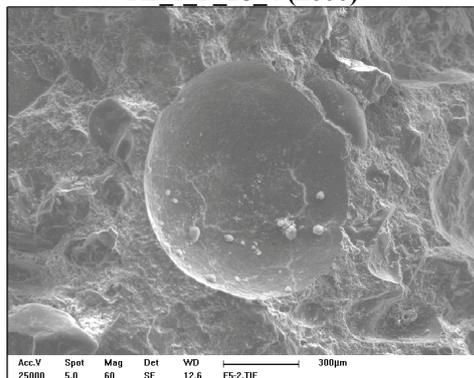
b. Zoom sur les microporosités de la pâte de ciment – R2_I_F_28_6 (x2000)



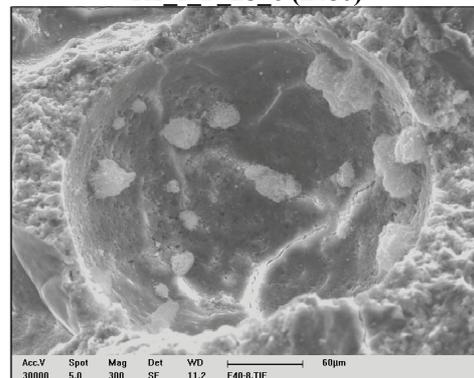
c. Microporosité de la pâte de ciment – R2_I_F_28_4 (x600)



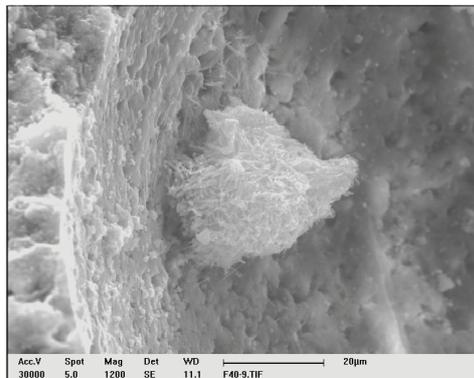
d. Phases anhydres dans la pâte de ciment – R1_I_F_28_6 (x480)



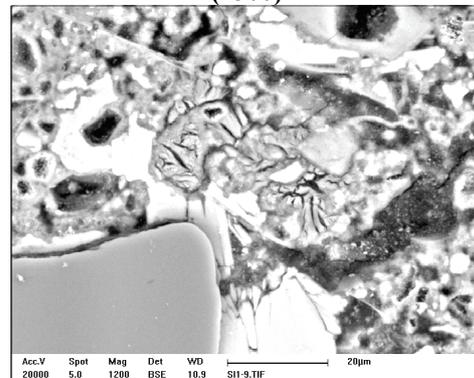
e. Vacuole vide – R1_I_F_28_6 (x60)



f. Vacuole contenant de l'ettringite – R2_I_F_28_4 (x300)



g. Zoom sur une pelote d'ettringite au sein d'une vacuole – R2_I_F_28_4 (x1200)



h. Nodules d'ettringite dans la matrice cimentaire – NR_I_F_28_4 (x1200)

Figure 2-17 : observations microscopiques des bétons à 28 jours

2.2 Potentiel de RSI d'origine thermique : application d'une cure thermique

2.2.1 Objectifs

Après coulage, on souhaite appliquer une cure thermique aux corps d'épreuve afin de recréer les conditions de maturation susceptibles de se développer dans une pièce massive, et notamment les conditions de température susceptibles d'y régner du fait de l'exothermie de la réaction d'hydratation du ciment. Dans ces travaux, on idéalise l'histoire thermique du matériaux par un profil « trapézoïdal » en fonction du temps afin de simuler simplement ces conditions en laboratoire. Il convient donc de déterminer les phases de chauffe, palier de température constante et refroidissement nécessaires à la mise en place d'un tel procédé. La présente section s'attache à la définition des principales caractéristiques du traitement thermique.

2.2.2 Mise au point théorique : cahier des charges

2.2.2.1 Humidité

Lors de la fabrication d'une pièce de béton, l'hydratation du ciment ne mobilise qu'une partie de l'eau de gâchage pour la formation d'hydrates. Cet excès d'eau, outre la porosité qu'il créera après séchage du matériau, induit une humidité relative importante dans tout le matériau au jeune âge. Les résultats de (*Grasley et al. 2006*) montrent que l'humidité relative dans de petits prismes de béton ordinaire reste supérieure à 90 % pendant plus de 7 jours, et ce même pour des corps d'épreuve soumis à un séchage.

A la lumière de ces éléments, il a été décidé de réaliser la cure thermique en eau. Ceci permet d'une part de disposer de conditions de cure réalistes par rapport aux conditions d'humidité existant au cœur d'une pièce massive après coulage et d'autre part de fabriquer des corps d'épreuve avec un matériau riche en eau, élément favorisant le développement futur de la RSI. Par ailleurs, la réalisation pratique d'un dispositif de traitement thermique est facilitée par l'emploi d'eau plutôt que d'air humide (fiabilité). L'eau apporte également une inertie thermique qui rend la régulation de température plus robuste vis-à-vis des perturbations extérieures.

2.2.2.2 Histoire thermique des poutres et des éprouvettes

L'objectif du traitement thermique est d'appliquer au sein des poutres (0,25x0,50x3,00 m) et des éprouvettes (de l'ordre de 0,1 m de diamètre pour 0,2 à 0,3 m de hauteur) une même histoire thermique afin de disposer d'un potentiel de gonflement équivalent d'un corps d'épreuve à un autre, mais également au sein d'un même corps d'épreuve. En particulier, on cherche à appliquer le traitement thermique avec une précision de $\pm 1^\circ\text{C}$ en phase de palier.

Du fait des dimensions des poutres, le contrôle de la température au centre de ces corps d'épreuve par application d'une condition limite en température en surface est difficile à assurer en raison de leur inertie thermique importante, et ce tout particulièrement au jeune âge où le mécanisme thermique prédominant est l'hydratation du ciment. Au contraire, la température de petits corps d'épreuve comme les éprouvettes est aisément

contrôlée par la température du bain, grâce notamment à des phénomènes d'échange thermique plus importants (rapport surface d'échange/volume plus important pour une éprouvette et coefficient d'échange élevé dans l'eau). La Figure 2-18 illustre ce phénomène : la simulation de l'échauffement à un taux constant de 5°C/h d'une poutre et d'un cylindre 11-22 conduit à des différences de température à cœur allant jusqu'à 12°C.

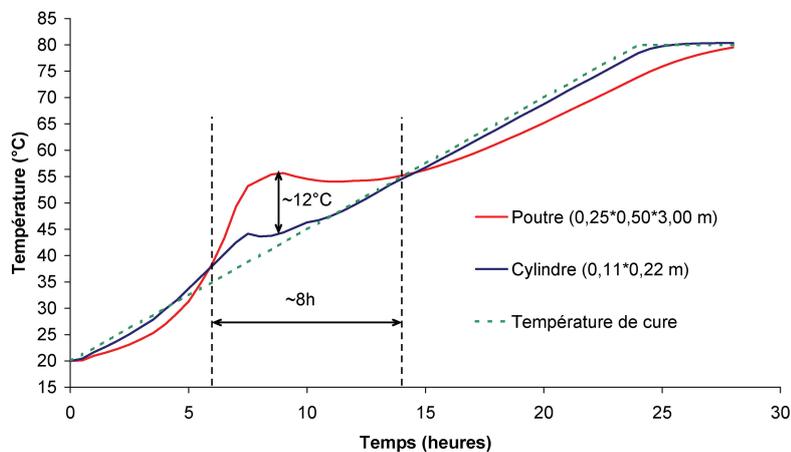


Figure 2-18 : simulation de la température au cœur de corps d'épreuve soumis à un échauffement constant (module TEXO CESAR-LCPC)

Afin d'éviter ces « effets d'échelle », il a été décidé de recréer des conditions adiabatiques en phase initiale de montée en température (*Martin & Toutlemonde 2010*). L'histoire des températures en phase de chauffe est donc calquée sur l'évolution de température déterminée par un essai Q_{AB} sur la formule R1 (cf. section 2.1.2), formule qui doit développer la RSI. En limitant les échanges thermiques avec l'extérieur, cette approche permet d'assurer une température la plus homogène possible dans des corps d'épreuve de toute taille. Par ailleurs, ceci permet également de recréer une histoire de température représentative de celle d'une pièce massive après coulage où les conditions d'échange très faible conduisent à des élévations de température importantes en période d'hydratation du ciment.

2.2.2.3 Palier de température

2.2.2.3.1 Durée

En fin de phase de chauffe, les corps d'épreuve sont soumis à un palier de température constante permettant, outre la déstabilisation des cristaux d'ettringite déjà formés, l'adsorption des sulfates par les CSH qui constitueront alors une réserve de réactifs pour le développement de RSI par la suite (*Barbarulo et al. 2007*). Selon (*Taylor et al. 2001*), le potentiel d'expansion augmente avec la durée de cure thermique jusqu'à une durée de trois jours. D'autre part, des mesures sur ouvrages réels montrent que la température au sein d'une pièce massive peut rester supérieure à 70°C pendant 8 jours (*Torrenti 1996, Divet 2002*). Ainsi, nous avons choisi une durée de palier égale à trois jours correspondant à un compromis entre le potentiel de gonflement apporté par le traitement thermique et la durée de celui-ci qui conditionne l'enchaînement des fabrications de corps d'épreuve.

2.2.2.3.2 Température

Comme indiqué en section 2.2.2.3.1, la phase de chauffe du traitement thermique reproduit des conditions adiabatiques en ajustant la température de cure sur le dégagement de chaleur mesuré lors de la réalisation d'un essai Q_{AB} . Ainsi, la température atteinte à la fin de cette phase peut être évaluée en calculant l'élévation de température du matériau en conditions adiabatiques.

(Waller 2000) donne la relation (2-1) pour le calcul de l'élévation de température en conditions adiabatiques où $\Delta T(\infty)$ est l'élévation de température en conditions adiabatiques à la fin de l'hydratation du ciment (en K), $Q(\infty)$ est la chaleur d'hydratation du ciment à temps infini (en J) et C_{th} est la capacité calorifique (ou thermique) du béton à 20°C (en J/K).

$$\Delta T(\infty) = \frac{Q(\infty)}{C_{th}} \quad (2-1)$$

La chaleur d'hydratation du ciment peut être évaluée à partir de la composition chimique de celui-ci. On rappelle, dans le Tableau 2-15, la composition chimique des deux ciments utilisés.

Tableau 2-15 : composition chimique des ciments (méthode de Bogue – analyses LCPC)

Ciment	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CSH ₂
NR	43,22%	32,16%	2,35%	11,63%	5,61%
R	41,45%	27,15%	4,97%	11,54%	7,44%

(Waller 2000) propose les chaleurs massiques d'hydratation suivantes pour chaque phase du ciment :

Tableau 2-16 : chaleurs massiques d'hydratation des phases du ciment selon (Waller 2000)

	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Chaleur massique d'hydratation (J/g)	510	260	1100	410

La chaleur d'hydratation de chaque ciment se calcule alors à l'aide de la relation (2-2) où q_c est la chaleur massique d'hydratation du ciment (en J/g), q_i la chaleur d'hydratation de la phase i (en J/g) et φ_i la proportion massique de la phase i dans le ciment (en g/g).

$$q_c = \sum_i (\varphi_i \cdot q_i) \quad (2-2)$$

Par combinaison des valeurs du Tableau 2-15 et du Tableau 2-16, on obtient des chaleurs massiques d'hydratation de 378 J/g de ciment et 384 J/g de ciment pour le ciment_NR et le ciment_R, respectivement.

La chaleur d'hydratation du ciment à temps infini $Q(\infty)$ se calcule à l'aide de la relation (2-3) où $\alpha(\infty)$ est le degré d'hydratation final du ciment, c le dosage en ciment du béton considéré (en g/m³) et q_c la chaleur massique d'hydratation du ciment (en J/g).

$$Q(\infty) = \alpha(\infty) \cdot c \cdot q_c \quad (2-3)$$

Sur la base d'une étude bibliographique et de ses propres résultats, (*Waller 2000*) propose la relation (2-4) pour évaluer le degré d'hydratation final d'un ciment. Le degré d'hydratation final de nos bétons de rapport E/C égal à 0,46 est donc égal à 0,78 selon cette relation.

$$\alpha(\infty) = 1 - e^{-3,3 \frac{E}{C}} \quad (2-4)$$

A partir des formulations données en section 2.1.1.2, on indique dans le Tableau 2-17 les quantités de chaleur dégagée lors de l'hydratation des trois formules de béton NR, R1 et R2, à temps infini, en conditions adiabatiques :

Tableau 2-17 : dégagement de chaleur en conditions adiabatiques des bétons

Formule	Q(∞) (kJ/m ³)
NR	120 900
R1	122 900
R2	122 900

Il reste alors à calculer la capacité calorifique du béton. (*Waller 2000*) donne la relation (2-5) où m_i est la quantité de constituant i dans le mélange (en g) et c_i la capacité thermique massique du constituant i (en J/K/g).

$$C_{th} = \sum_{i=\text{constituants}} m_i \cdot c_i^{th} \quad (2-5)$$

La capacité thermique massique d'un ciment peut s'évaluer par combinaison linéaire des proportions massiques de chaque phase du ciment et de leurs capacités thermiques massiques données dans le Tableau 2-18. Le calcul donne respectivement des capacités thermiques massiques de 0,73 et 0,72 J/K/g pour le ciment_NR et le ciment_R.

Tableau 2-18 : capacités thermiques massiques des phases du ciment (*Waller 2000*)

	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CSH ₂
C _{th} (J/K.g)	0,745	0,740	0,768	0,815	1,074

(*Waller 2000*) donne des capacités thermiques massiques de 0,73 J/K.g pour des granulats siliceux (gravillon_NR et sable_NR), 0,84 J/K.g pour des granulats calcaires (gravillon_PR) et 4,19 J/K.g pour l'eau. Afin de prendre en compte la réduction de capacité thermique massique induite par la mobilisation d'eau pour la formation d'hydrates, la norme NF EN 196-9 (*AFNOR 2004*) propose d'utiliser une capacité thermique massique réduite de l'eau égale à 3,80 J/K.g. (*Jolicoeur et al. 1994*) considèrent quant à eux une réduction de capacité thermique massique fonction de la quantité d'eau liée suivant la relation (2-6). La masse d'eau liée est évaluée en considérant qu'elle est égale à 23 % de la masse de ciment hydraté. Enfin, (*Waller 2000*) considère quant à lui une réduction forfaitaire de la capacité calorifique suivant la relation (2-7) où c est la quantité de ciment contenue dans le béton considéré et α le degré d'hydratation de celui-ci.

$$C_{th} = \sum_{i=\text{constituants}} m_i \cdot c_i^{th} - e_{liée} \cdot 2,0 \quad (2-6)$$

$$\Delta C_{th} = -0,44 \cdot c \cdot \alpha(\infty) \quad (2-7)$$

Les capacités thermiques volumiques des bétons peuvent alors être calculées à partir de ces valeurs et des formules de bétons fournies en section 2.1.1.2. Les résultats de ces calculs sont consignés dans le Tableau 2-19.

Tableau 2-19 : capacités thermiques massiques des bétons (kJ/K/m³)

	Sans réduction H ₂ O	Réduction H ₂ O forfaitaire (AFNOR 2004)	(Jolicoeur et al. 1994)	Réduction forfaitaire (Waller 2000)
NR	2395	2322	2247	2254
R1	2388	2314	2240	2247
R2	2548	2469	2400	2407

La précision et l'exactitude de ces capacités thermiques volumiques peuvent difficilement être évaluées. Toutefois, elles fournissent probablement un encadrement de la valeur réelle (qui évolue au cours de l'hydratation), entre une capacité thermique surestimée prenant en compte tout les constituants de manière indépendante et une autre considérant une quantité très importante d'eau liée comme le proposent (Jolicoeur et al. 1994). Nous avons réalisé le calcul d'élévation de température pour l'ensemble de ces valeurs, obtenant ainsi un encadrement de l'élévation de température en conditions adiabatiques (cf. Tableau 2-20). On obtient des élévations de températures de l'ordre de 50°C à 55°C. Les fabrications de corps d'épreuve étant réalisées à une température moyenne de 20-25°C, la température finale en conditions adiabatiques sera donc de l'ordre de 80°C, valeur à laquelle la température du palier de cure thermique est fixée.

Tableau 2-20 : évaluation des élévations de température en conditions adiabatiques (°C)

	Sans réduction H ₂ O	Réduction H ₂ O forfaitaire (AFNOR 2004)	(Jolicoeur et al. 1994)	Réduction forfaitaire (Waller 2000)
NR	50	52	54	54
R1	51	53	55	55
R2	48	50	51	51

2.2.2.4 Refroidissement

La cure thermique s'achève par une phase de refroidissement. Afin d'éviter la fissuration des corps d'épreuve par choc thermique et pour être représentatif des phénomènes observés lors de la fabrication de pièces massives, la vitesse de refroidissement est fixée à -1°C/h.

2.2.2.5 Conclusion : définition du traitement thermique

Sur la base des critères listés de la section 2.2.2.1 à la section 2.2.2.4, le traitement thermique appliqué aux corps d'épreuve est représenté par la Figure 2-19 (les consignes de température correspondantes sont listées dans le Tableau 2-21). Le traitement thermique est initié deux heures après le début du coulage (durée de mise en œuvre des matériaux).

Après une phase de chauffe terminée 24 heures après le début du coulage (vitesse de chauffe maximale de l'ordre de $10^{\circ}\text{C}/\text{h}$), on applique un palier de température constante à une température de 81°C pendant 72 heures. Le traitement thermique est achevé par une phase de refroidissement à une vitesse de $-1^{\circ}\text{C}/\text{h}$ jusqu'à une température de 25°C (atteinte en fin de journée six jours après le coulage). Le traitement thermique est stoppé à cette température afin d'éviter la poursuite de l'injection d'eau froide en trop grande quantité (nécessaire pour maintenir la vitesse de refroidissement jusqu'à des températures plus basses) pouvant conduire à une lixiviation des alcalins plus conséquente. Une fois cette température atteinte, le bain de cure thermique est vidangé très lentement (afin de dissocier le choc thermique du choc hydrique) durant la nuit avant les opérations de décoffrage qui ont lieu sept jours après le coulage.

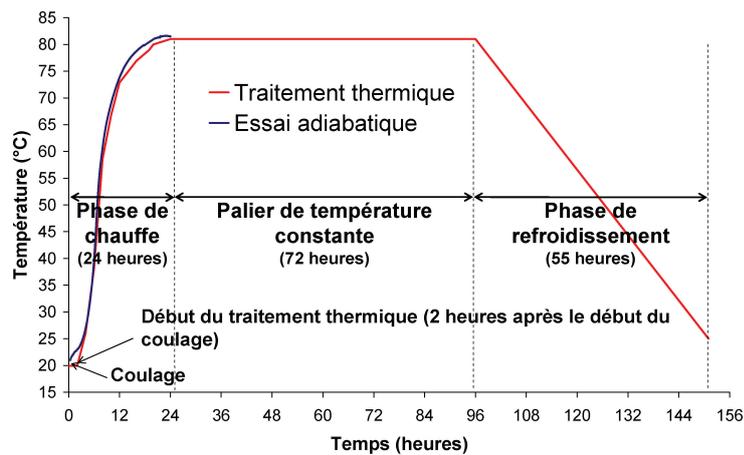


Figure 2-19 : profil de traitement thermique des corps d'épreuve

Tableau 2-21 : consigne de traitement thermique visée

Temps (h)	Température visée ($^{\circ}\text{C}$)
0	20
2	20
3	23
4	26
5	32
6	38
8	59
9	63
10	67
11	70
12	73
14	75
16	77
19	79
20	80
24	81
96	81
151	25

2.2.3 Validation théorique : modélisation du traitement thermique

Afin d'estimer la pertinence du procédé de cure thermique tel que nous l'avons défini, il est nécessaire d'évaluer la réponse thermique des différents corps d'épreuve lorsqu'ils sont soumis à la cure. Pour cela, des modélisations numériques ont été mises en œuvre et sont décrites dans cette section.

2.2.3.1 Caractéristiques des modèles

A l'aide du module TEXO du code aux éléments finis CESAR-LCPC (*Torrenti et al. 1995, Humbert, Mestat et al. 2005*), la cure thermique d'une poutre (0,25 x 0,50 x 3,00 m³) et celle d'une éprouvette (diamètre = 0,11 m ; hauteur = 0,22 m) ont été simulées. Les caractéristiques et paramètres principaux des modèles sont regroupés dans le Tableau 2-22 et la Figure 2-20. Pour ces modèles, une des principales données d'entrée est le dégagement de chaleur en conditions adiabatiques du matériau tel qu'il a été évalué en section 2.1.2.

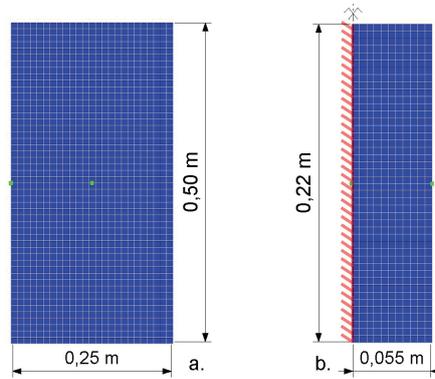


Figure 2-20 : maillages et points de post-traitement (a. poutre ; b. éprouvette 11-22)

Tableau 2-22 : caractéristiques des modèles TEXO

Modèle poutre		2D
Modèle éprouvette		2D axisymétrique
Coefficient d'échange thermique coffrage/eau		100 W/(m ² .°C)
Conductivité thermique	K _x	1,67 W/(m.°C)
	K _y	1,67 W/(m.°C)
	K _{xy}	0 (conductivité isotrope)
Capacité calorifique du béton durci C _{th}		2400 kJ/(m ³ .K)

2.2.3.2 Réponse thermique d'une poutre – formule R1

La Figure 2-21 représente l'évolution de la température au centre et en bord de section d'une poutre coulée avec la formule R1 (soit la formule la plus exothermique considérée pour dimensionner la cure thermique) au cours du traitement thermique. Ces résultats montrent l'intérêt du choix d'une phase de chauffe calée sur un dégagement de chaleur en conditions adiabatiques : on obtient un champ de température relativement

homogène lors de cette étape et ce malgré les vitesses de chauffe importantes pour atteindre le palier de température. Par ailleurs, on n’observe que très peu de dépassement de consigne au cœur de la poutre : l’approche proposée permet donc bien de limiter les effets d’inertie thermique des corps d’épreuve.

La Figure 2-22 représente l’évolution de la différence de température entre le centre et le bord d’une poutre au cours de la cure thermique. Cette différence reste inférieure à 4°C en phase de chauffe et est de l’ordre de 3°C en phase de refroidissement. Lors de l’application du palier de cure thermique (i.e. entre $t = 24$ heures et $t = 96$ heures), cette différence reste quasi-nulle. La Figure 2-23 caractérise l’homogénéité du champ de température dans une section transversale de poutre à différents instants. Le traitement thermique défini répond donc bien aux critères fixés par le cahier des charges de l’étude.

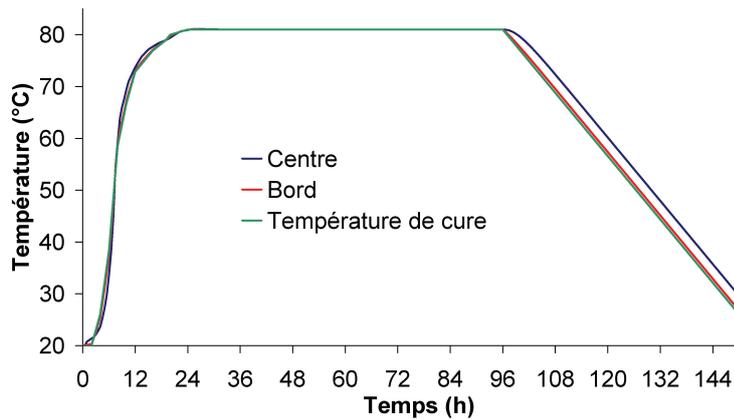


Figure 2-21 : réponse thermique théorique d’une poutre – formule R1

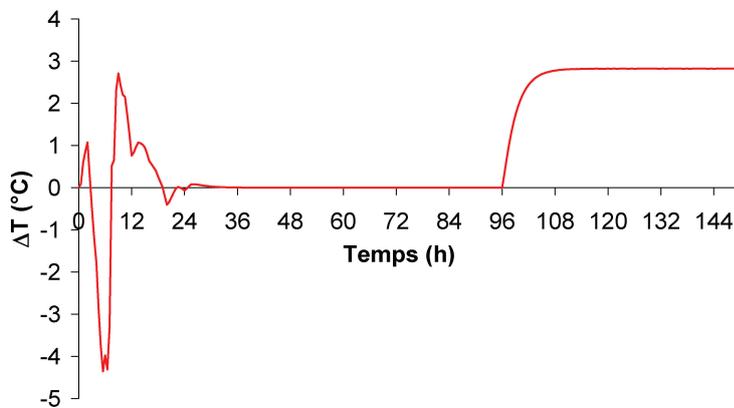


Figure 2-22 : écart de température entre centre et bord de section d’une poutre – formule R1

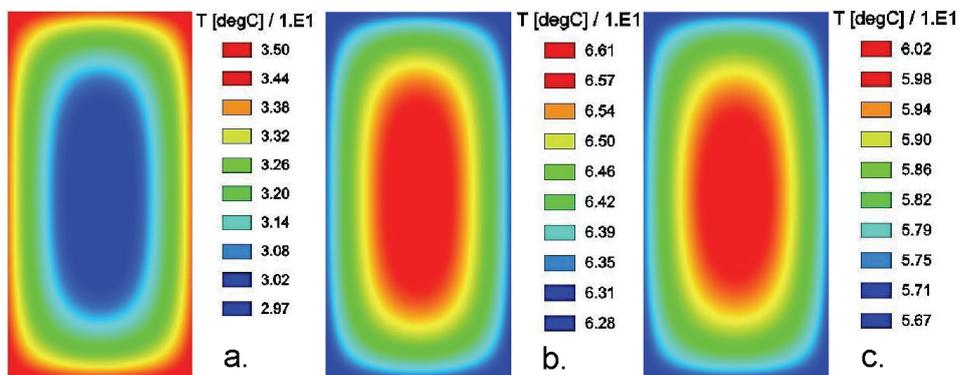


Figure 2-23 : champs de température dans une poutre à différents instants caractéristiques – formule R1 (a. $t = 5,5$ h ; b. $t = 9$ h ; c. $t = 120$ h)

2.2.3.3 Effets de l'inertie thermique : influence des dimensions des corps d'épreuve

Le programme expérimental prévoit la fabrication de poutres, de blocs et d'éprouvettes : les différences de dimension de ces corps d'épreuve induisent des différences d'inertie thermique et donc des différences de comportement thermique. Le procédé de cure thermique a été conçu pour minimiser autant que possible ces effets entre des corps d'épreuve de tailles différentes. La Figure 2-24 représente l'écart théorique de température entre le cœur d'une poutre et celui d'une éprouvette fabriquées avec la formule R1 et soumise à cure thermique. Ces écarts de température restent inférieurs à 5°C lors de la phase de chauffe et sont quasi-nuls durant le palier de température constante, satisfaisant ainsi le cahier des charges de cure thermique. On notera par ailleurs la similitude des courbes représentées dans la Figure 2-22 et la Figure 2-24 : ceci confirme qu'il est plus simple de contrôler la température au sein d'un petit corps d'épreuve comme une éprouvette que pour un corps d'épreuve plus massif comme une poutre : la température au cœur d'une éprouvette est quasiment identique à la température de consigne à tout instant.

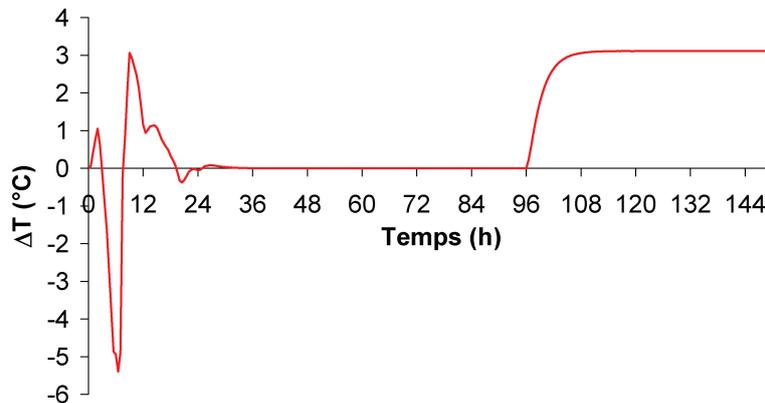


Figure 2-24 : écart de température entre le cœur d'une poutre et celui d'une éprouvette – formule R1

2.2.3.4 Robustesse du traitement thermique

Le traitement thermique d'une poutre coulée avec la formule NR a été modélisé. On applique ainsi à un matériau un traitement thermique conçu pour une formule plus exothermique (cf. Figure 2-16). On cherche ici à vérifier que le traitement thermique défini peut être utilisé pour les corps d'épreuve coulés à l'aide du béton NR.

La Figure 2-25 illustre l'évolution de la température au centre et au bord de la section pour cette poutre au cours de la cure thermique. Ces résultats montrent des évolutions de température quelque peu différentes de celles du modèle précédent. On observe en début et en fin de phase de chauffe des écarts de température du corps d'épreuve par rapport à la température de consigne qui sont plus importants et notamment un dépassement de consigne de l'ordre de 1,8 °C pendant une quinzaine d'heures en phase de palier. Ceci est lié au fait que le corps d'épreuve n'est plus placé dans des conditions pseudo-adiabatiques en phase de chauffe. Ces écarts restent toutefois faibles et acceptables vis-à-vis des critères fixés. Par ailleurs, l'intégration des profils de température pour des valeurs dépassant un seuil de 60°C (seuil au delà duquel on considère un risque potentiel de RSI – cf. relation (2-8)) montre des valeurs très similaires, indiquant que l'on fournit

une énergie équivalente pour les deux types de corps d'épreuve (2054°C.h et 2071°C.h pour les formules R1 et NR, respectivement).

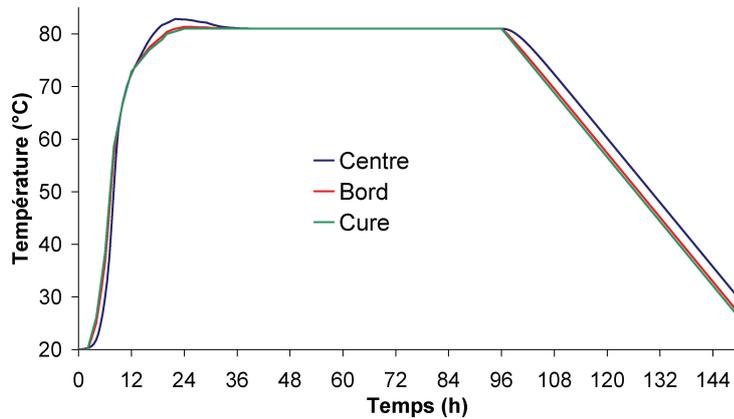


Figure 2-25 : réponse thermique théorique d'une poutre – formule NR

$$E_{\text{traitement thermique}} = \int_{\text{cure thermique}} (T_{>60^{\circ}\text{C}} - 60) dt \quad (2-8)$$

Les formules R1 et R2 montrent des comportements exothermiques très proches. Ainsi, les réponses thermiques de poutres coulées avec ces deux formules sont comparables. On ne présente donc pas ici les résultats théoriques correspondants.

2.2.3.5 Risque de fissuration d'origine thermique

La Figure 2-26.a représente l'évolution des contraintes principales σ_1 en phase de refroidissement, phase la plus critique vis-à-vis de la fissuration (choc thermique). On observe que ces contraintes restent inférieures à 1,5 MPa et 2,5 MPa pour les poutres en béton R1 et NR, respectivement. Ces différences s'expliquent par des états de contrainte différents développés en début de cure thermique du fait de la différence d'histoire thermique. Toutefois, les contraintes développées restent suffisamment faibles pour ne pas craindre une fissuration associée à un gradient thermique. Ces considérations théoriques ont été confirmées expérimentalement par l'absence de fissuration apparente en fin de cure thermique.

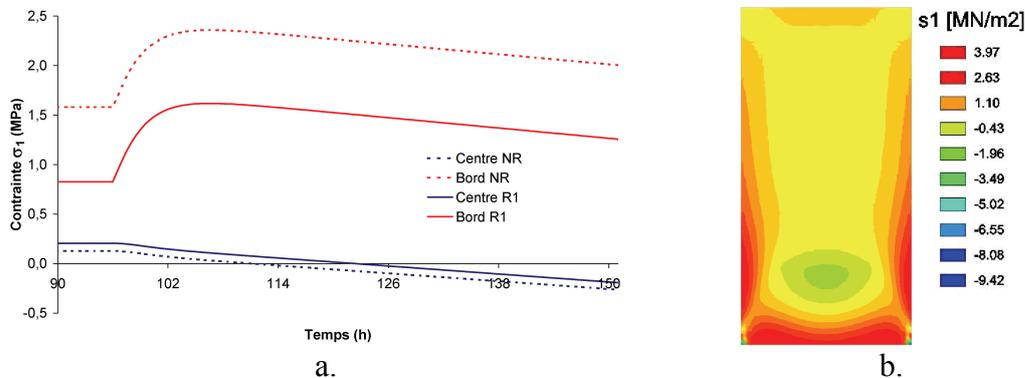


Figure 2-26 : a. évolution des contraintes principales σ_1 en phase de refroidissement b. champs de contrainte principale σ_1 à t = 102 h

2.2.3.6 Conclusions

L'étude numérique de la réponse thermique des corps d'épreuve à une cure semble indiquer que le processus tel qu'il a été défini en section 2.2.2 répond aux attentes que nous nous sommes fixées dans le cadre de ce programme expérimental. En particulier, la définition d'une phase de chauffe calée sur le dégagement de chaleur du matériau en condition adiabatique permet de limiter les écarts thermiques en phase de chauffe et d'imposer un champ de température homogène dans des corps d'épreuve de toute dimension en phase de palier.

2.2.4 Réalisation expérimentale : méthodes et validation

2.2.4.1 Dispositif expérimental

2.2.4.1.1 Système de cure thermique

La cure thermique est réalisée à l'aide d'un dispositif spécialement conçu spécifiquement à l'occasion de la présente recherche (Martin et al. 2008). Il s'agit d'un bac rempli d'eau mise en circulation par des pompes et dont la température est régulée à l'aide d'un thermoplongeur de 24 kW (cf. Figure 2-27) géré par un automate programmable. Le point d'injection d'eau chaude est située en partie basse du bac afin de faciliter l'homogénéisation de la température par convection (cf. Figure 2-27.a). Devant les fortes variations thermiques imposées à l'intérieur de la cuve, un renforcement de la structure à l'aide de goussets a dû être réalisé au niveau des angles.

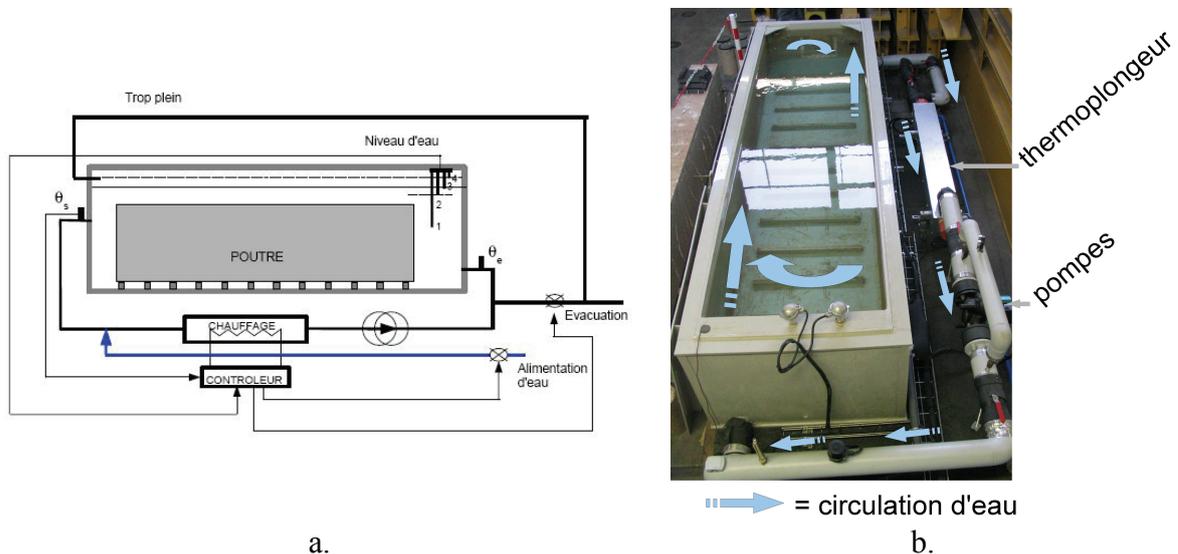


Figure 2-27 : dispositif de traitement thermique (a. schéma de principe ; b. vue d'ensemble du système)

Le principe du dispositif d'étuvage est représenté par la Figure 2-27. Sur cette figure, les symboles θ_e et θ_s correspondent aux sondes de température positionnées respectivement aux points d'entrée et de sortie de l'eau dans le bac de traitement thermique et utilisées pour la régulation de la température. Le bac en polypropylène de dimensions intérieures 350x85x75 cm dispose de parois latérales à structure « sandwich » constituée d'une couche de laine de roche de 5 cm entre deux plaques de polypropylène d'épaisseurs 1,5 cm et 1,2 cm. Les panneaux sont assemblés par soudage. La couverture supérieure du

Le bac est constitué par un ensemble de trois panneaux amovibles en polypropylène d'épaisseur 1 cm. Afin d'améliorer l'isolation supérieure, une couverture isolante peut être mise en place. Il s'agit d'un matériau multicouche dont le pouvoir isolant est équivalent à celui de 25 cm de laine de verre. Le fond du bac est constitué d'une plaque de polypropylène de 1,5 cm d'épaisseur qui repose sur tapis isolant posé sur des palettes. Afin d'assurer une circulation d'eau en dessous des corps d'épreuve, des baguettes de 3 cm de hauteur sont disposées au fond du bac et servent d'élevateurs.

2.2.4.1.2 Performances

Des essais de performance sur le système indiquent que la température peut être régulée avec une précision de $\pm 0,5^\circ\text{C}$ en phase de palier (i.e. après stabilisation). Le procédé est répétable avec une précision de $\pm 0,5^\circ\text{C}$. L'homogénéité de la température dans le bain a été vérifiée et montre des différences maximales de température dans le bain de 1°C . Ces performances sont en accord avec le cahier des charges fixé.

2.2.4.1.3 Réalisation expérimentale de la cure thermique

La Figure 2-28 représente une réalisation expérimentale du traitement thermique à l'aide du dispositif. Le système étant asservi uniquement en chauffe (pas de dispositif de refroidissement intégré), l'injection d'eau froide dans le bac en phase de refroidissement est nécessaire pour disposer de conditions contrôlées (mobilisation du système de chauffe pour assurer la régulation de la température). Ceci peut impliquer un risque de lixiviation des alcalins supplémentaire durant la phase finale du traitement thermique. Ceci explique que le procédé soit stoppé à 25°C . Une fois cette température atteinte (température atteinte en fin de journée du jour J), une vidange lente du dispositif est réalisée et se termine au matin du jour J+1 juste avant le décoffrage des corps d'épreuve. Ce procédé permet de dissocier le choc thermique du choc hydrique et limite ainsi d'autant plus le risque de fissuration.

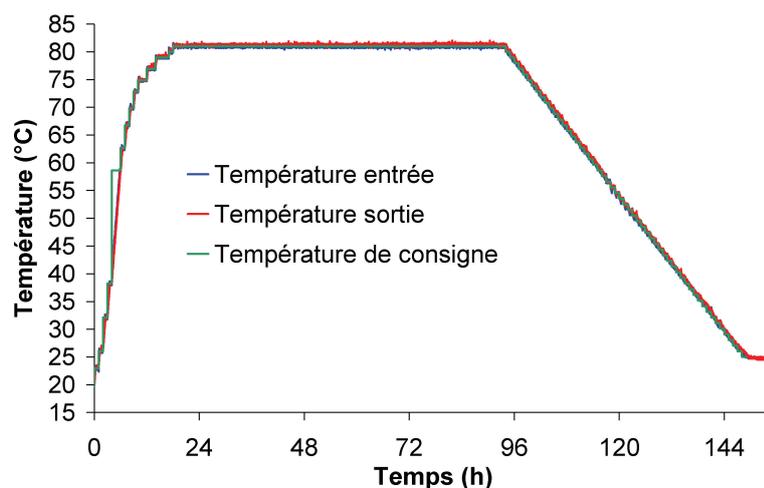


Figure 2-28 : exemple de réalisation expérimentale de la cure thermique

2.2.4.2 Réponse thermique expérimentale d'une poutre – formule R1

Afin d'évaluer expérimentalement le comportement d'une poutre au cours du traitement thermique, P2 (formule R1, non armée) a été instrumentée dans une section courante (à 0,6 m de l'extrémité longitudinale – cf. Annexe 1) à l'aide de capteurs de température en des points nommés M1, M2, M3, M4 et M5 respectivement situés à 0,04 m, 0,08 m, 0,17 m, 0,27 m et 0,37 m de profondeur par rapport à la face supérieure de la poutre (cf. Figure 2-29). La Figure 2-30, la Figure 2-31 et la Figure 2-32 représentent l'évolution de la température en ces points respectivement durant la phase de chauffe, le palier de température et le refroidissement.

On observe que le comportement expérimental est globalement en accord avec la modélisation présentée en section 2.2.3.2. Durant la phase de chauffe, les écarts de température aux différents points instrumentés restent très majoritairement inférieurs à $\pm 2^\circ\text{C}$ malgré les vitesses de chauffe importantes (cf. Figure 2-33). Ceci confirme expérimentalement l'intérêt du calage de la phase de chauffe sur les résultats de l'essai Q_{AB} correspondant au béton le plus exothermique, assurant ainsi un champ de température le plus homogène possible dans un corps d'épreuve d'inertie thermique importante. Ces différences de température n'excèdent pas $\pm 0,5^\circ\text{C}$ durant le palier de la cure, respectant ainsi le critère fixé par le cahier des charges.

Néanmoins, lors de la transition phase de chauffe – palier, on observe un léger dépassement de la consigne de cure à l'intérieur de la poutre de l'ordre de 1°C durant une dizaine d'heures. Toutefois, cela n'entraîne pas l'apparition d'un gradient thermique ne satisfaisant pas les critères fixés dans le cahier des charges.

Enfin, lors du refroidissement, ces écarts restent inférieurs à 1°C jusqu'à une température d'environ 45°C à partir de laquelle il devient plus difficile d'assurer une vitesse de refroidissement constante. Au delà de cette température, les différences de température n'excèdent pas 2°C . Finalement, ces résultats permettent de valider le procédé de cure thermique vis-à-vis des critères d'homogénéité du champ de température.

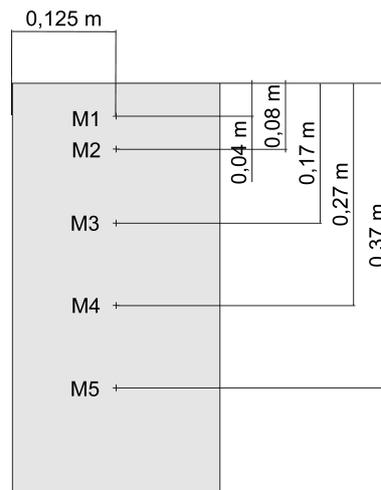


Figure 2-29 : emplacement des mesures de température dans les poutres (section à 0,60 m de l'about Sud)

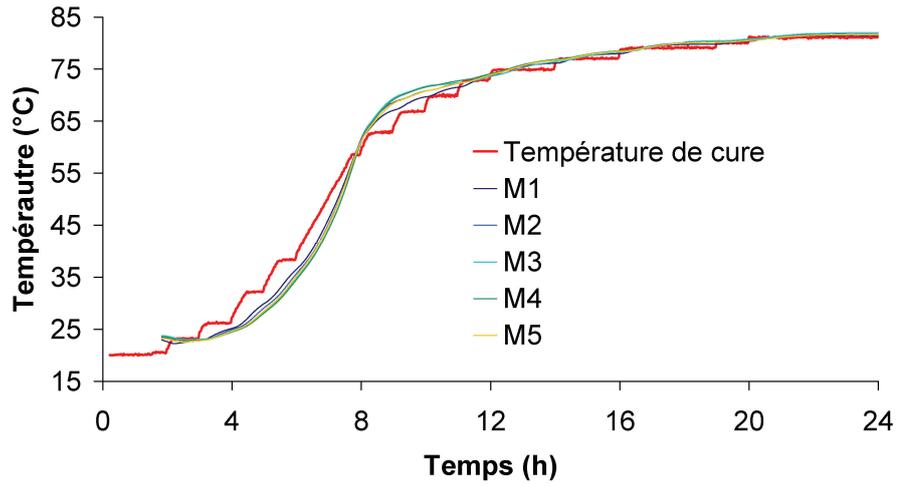


Figure 2-30 : réponse thermique expérimentale de P2 – phase chauffé

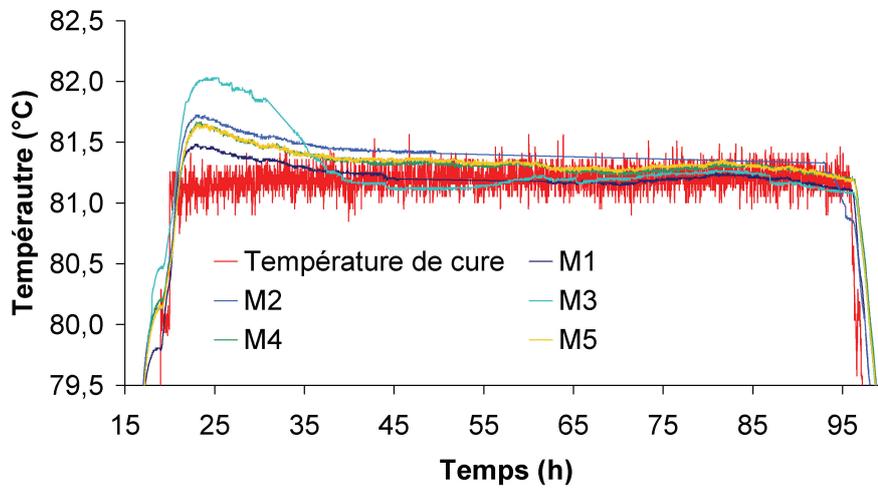


Figure 2-31 : réponse thermique expérimentale de P2 – palier de température

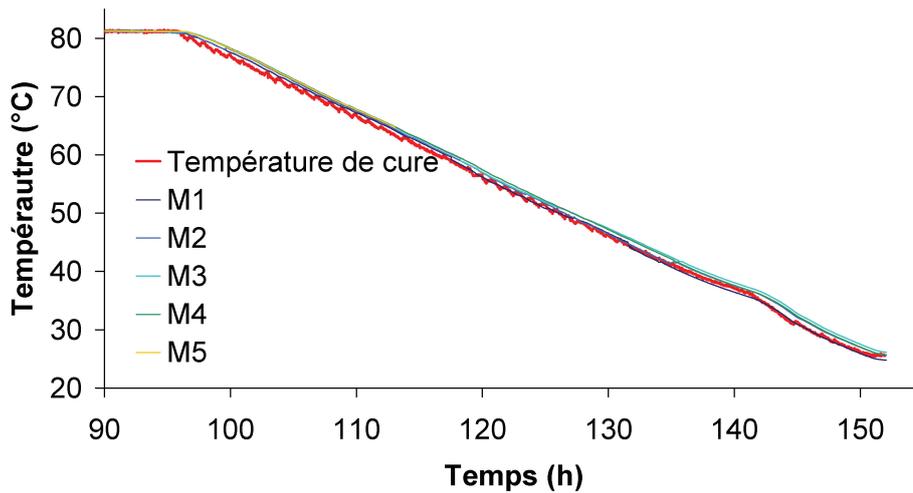


Figure 2-32 : réponse thermique expérimentale de P2 - refroidissement

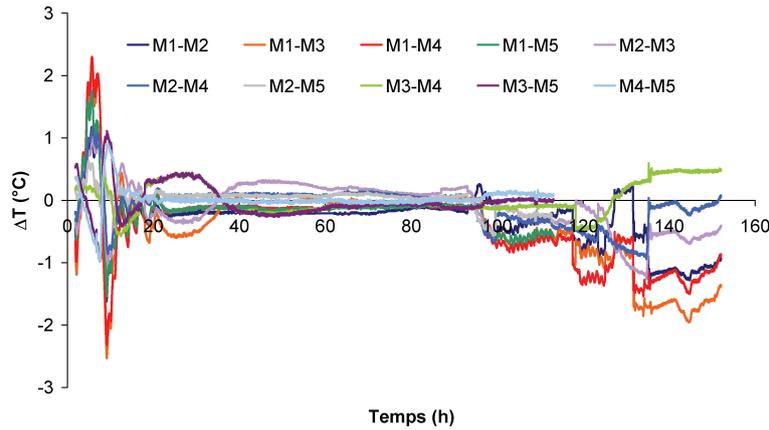


Figure 2-33 : écarts de température enregistrés au sein de P2 durant la cure thermique

La Figure 2-34 compare l'évolution de la température au point M4 durant la phase de chauffe, selon qu'elle est obtenue expérimentalement ou numériquement. Les prédictions du modèle TEXO se révèlent en assez bon accord avec la réalisation pratique de la cure thermique. Néanmoins, on observe qu'à partir de $t = 8$ heures, le modèle présente une tendance à sous-estimer la température au cœur de la poutre (écart maximal de l'ordre de 3°C). Ceci peut s'expliquer notamment par une différence d'avancement de la réaction d'hydratation du ciment à cet instant, trouvant son origine dans la différence d'état thermique expérimental et théorique au moment de la mise en œuvre : si le modèle prend en compte un matériau mis en œuvre à une température de 20°C , l'expérience a montré que cette hypothèse est difficile à satisfaire avec précision, du fait notamment de la variabilité de la température ambiante au moment des fabrications ou bien encore sous l'effet du malaxage.

La Figure 2-35 représente l'évolution de l'écart de température entre les points M4 et M1 tout au long de la cure. Ces résultats mettent en évidence la bonne corrélation entre le comportement thermique prédit et celui observé expérimentalement. On remarque toutefois que le modèle surestime cette fois-ci l'écart durant le refroidissement. Dans cette phase de la cure, les réactions d'hydratation ne constituent plus qu'une part minime des phénomènes thermiques régissant le comportement du corps d'épreuve, les pertes par échange devenant dominantes. Il est probable que la différence observée soit liée à une surestimation de la capacité calorifique de la poutre d'une part (qui se révèle compliquée à évaluer car elle évolue en fonction de la température et du degré d'avancement des réactions d'hydratation) et à une sous-estimation du coefficient d'échange coffrage/eau d'autre part. Toutefois, ces écarts restent limités.

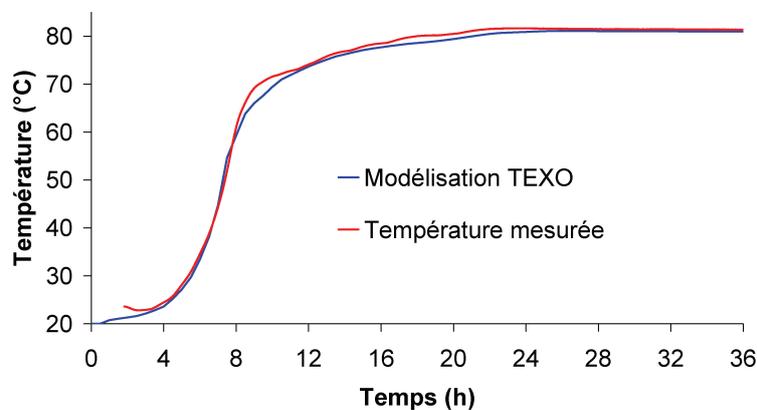


Figure 2-34 : évolution de température au point M4 (0,27 m) en phase de chauffe – poutre P2

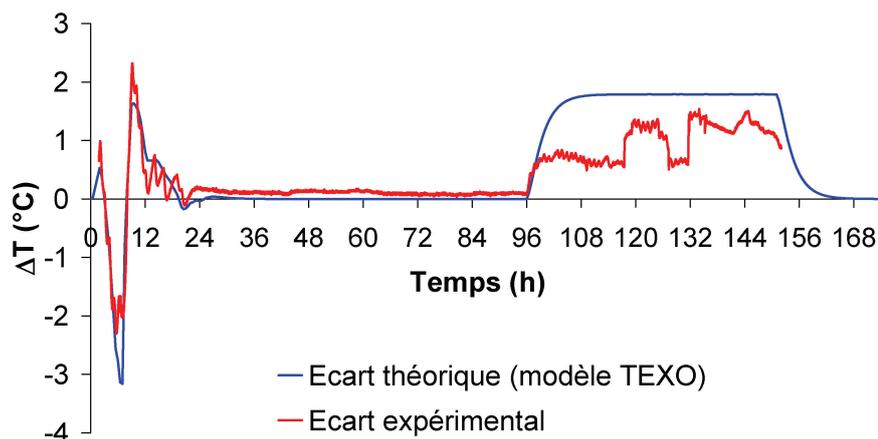


Figure 2-35 : écarts de température entre les points M4 (0,27 m) et M1 (0,04 m)

2.2.4.3 Maîtrise des effets d'échelle

Afin d'évaluer la pertinence de la cure thermique vis-à-vis de la maîtrise de effets d'inertie thermique liés à la variabilité des dimensions des corps d'épreuve, la Figure 2-36 compare les écarts de température entre le point M4 de la poutre P2 (proche de son cœur) et celui d'une éprouvette 11-22 de même composition. On observe durant la phase de chauffe un comportement thermique comparable suivant l'approche considérée. Toutefois, les différences d'état thermique initial conduisent à des écarts maximaux de l'ordre de 3°C entre le modèle et l'expérience. Tout au long du palier de cure, les différences de température entre corps d'épreuve restent inférieures à 1°C, satisfaisant ainsi la cible fixée par le cahier des charges. Enfin, durant le refroidissement, on note une fois de plus une surestimation de cet écart pour les mêmes raisons que celles exposées en section 2.2.4.2 (évaluation des capacités thermiques et des conditions d'échange). Au final, la réalisation expérimentale de la cure sur une poutre et une éprouvette a permis de valider le procédé vis-à-vis de l'objectif consistant à appliquer une histoire thermique similaire pour des corps d'épreuve de dimensions différentes (objectif dont on peut rappeler le caractère critique avec le contre-exemple fourni par [Fasseu 2010]).

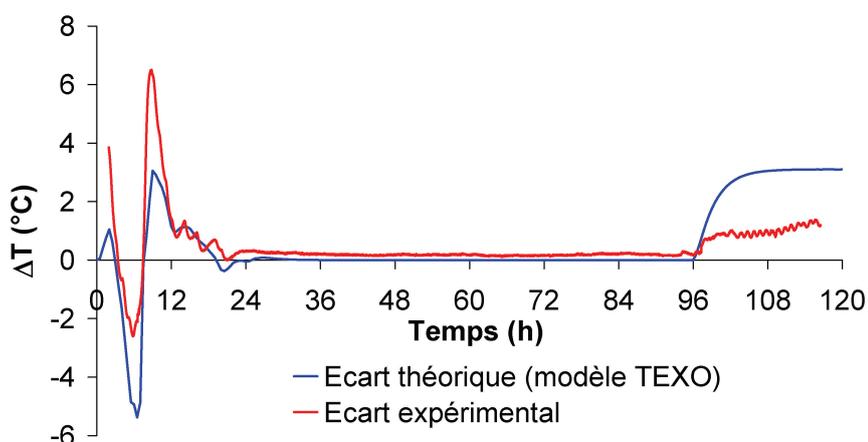


Figure 2-36 : écart de température entre le cœur d'une poutre (point M4) et celui d'une éprouvette (formule R1)

2.2.4.4 Robustesse du traitement thermique

La Figure 2-37, la Figure 2-38 et la Figure 2-39 représentent la réponse thermique expérimentale de la poutre P1 (formule NR, non armée) lors de la cure thermique. Les points M1, M2, M3, M4 et M5 sont respectivement situés à 0,04 m, 0,08 m, 0,17 m, 0,27 m et 0,37 m de profondeur par rapport à la face supérieure de la poutre. L'évolution de température mesurée est comparable aux prédictions du modèle de la section 2.2.3.4.

Un « retard » de la température du corps d'épreuve par rapport à la consigne constitue la principale différence par rapport au comportement d'une poutre fabriquée avec la formule R1. Ceci est cohérent avec le résultat de l'essai Q_{AB} de la formule NR : ce matériau présente un caractère moins exothermique. Par conséquent, la phase de chauffe de la cure calée sur le dégagement de chaleur en conditions adiabatiques de la formule R1 impose des échauffements plus rapides que ceux que peut développer le matériau NR en l'absence d'échange thermique.

A l'approche du palier de température constante, on observe au cœur de la poutre un dépassement de la température de consigne supérieur à celui observé pour la poutre P2. Ceci peut s'expliquer une fois de plus par la différence de propriétés exothermiques des formules NR et R1 et par l'inertie thermique importante du corps d'épreuve considéré.

Enfin, en phase de refroidissement, le comportement de P1 est comparable à celui de P2, confirmant ainsi qu'à ce stade, l'essentiel des réactions d'hydratation est achevé.

La Figure 2-40 représente l'évolution des écarts de température enregistrés aux différents points de P1. On observe que ces écarts restent inférieurs à 2°C en phase de chauffe, et ce malgré les écarts de température du corps d'épreuve par rapport à la consigne de traitement. De plus, ces écarts restent inférieurs à $\pm 1^{\circ}\text{C}$ en phase de palier, satisfaisant ainsi le cahier des charges fixé.

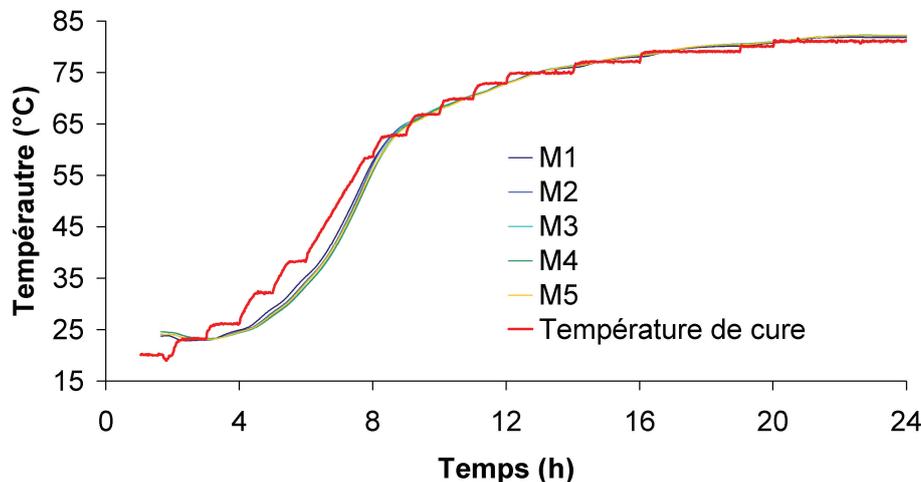


Figure 2-37 : réponse thermique expérimentale de P1 –chauffe

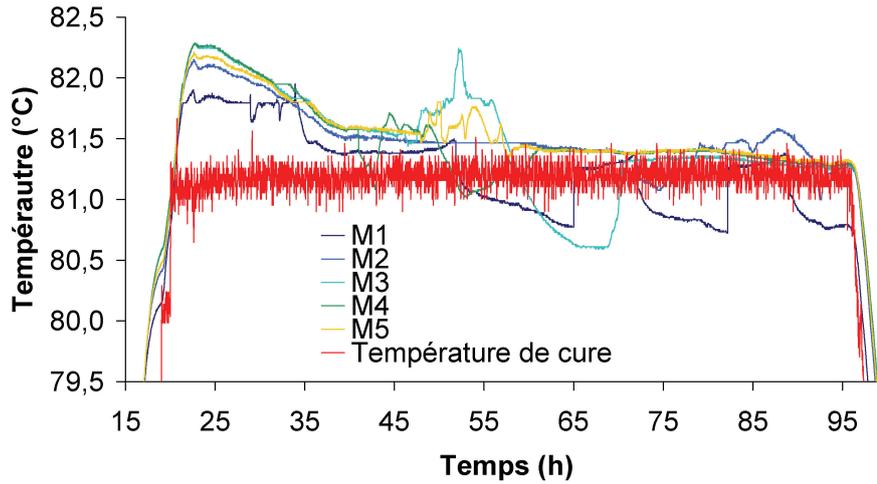


Figure 2-38 : réponse thermique expérimentale de P1 – palier de température

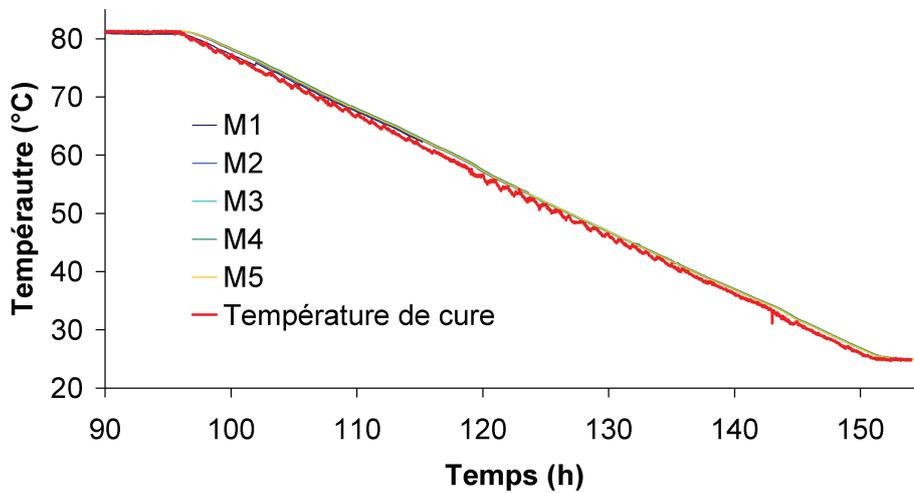


Figure 2-39 : réponse thermique expérimentale de P1 - refroidissement

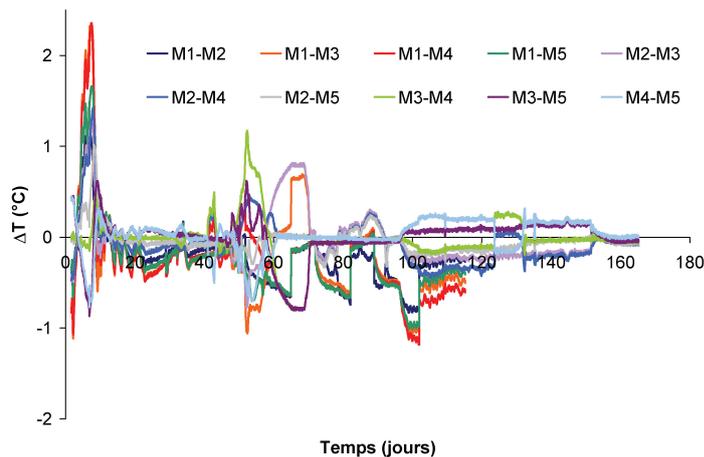


Figure 2-40 : écarts de température enregistrés au sein de P1 durant la cure thermique

La Figure 2-41 compare l'évolution de la température au point M4 durant la phase de chauffe obtenue expérimentalement ou numériquement. Les prédictions du modèle TEXO sont en accord avec la réalisation pratique de la cure thermique. Une fois de plus, on observe une tendance du modèle à sous-estimer la température au cœur de la poutre. Ces différences sont une nouvelle fois attribuées à la différence d'avancement de la

réaction d'hydratation du ciment et aux difficultés à évaluer précisément les coefficients d'échange thermiques et la capacité calorifique du matériau.

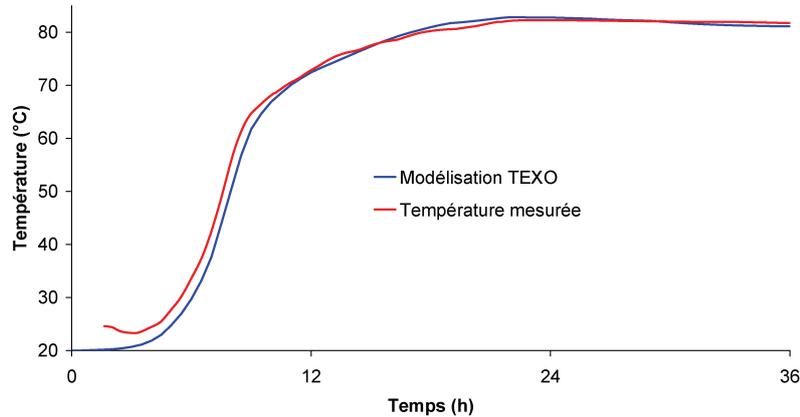


Figure 2-41 : évolution de température au point M4 (0,27 m) en phase de chauffe – poutre P1

La Figure 2-42 confronte l'évaluation théorique et pratique des écarts de température entre la poutre P2 (formule R1) et la poutre P1 (formule NR) au point M4 (proche du cœur de la poutre). La modélisation des cures thermiques de corps d'épreuve reproduit qualitativement les principales phases du comportement thermique des corps d'épreuve. Néanmoins, on observe une différence assez nette entre la théorie et la pratique, différence qui peut une fois de plus être attribuée à l'idéalisation des conditions initiales et des conditions aux limites dans le cadre de la modélisation ainsi qu'aux difficultés d'évaluation précise du coefficient d'échange et de la capacité calorifique. En outre, l'influence de la température extérieure peut également conduire à des écarts entre expérience et modélisation en début d'essai. Toutefois, les écarts évalués expérimentalement se révèlent moindres que ceux prédits par le modèle et restent inférieurs à la cible de $\pm 1^\circ\text{C}$ fixée.

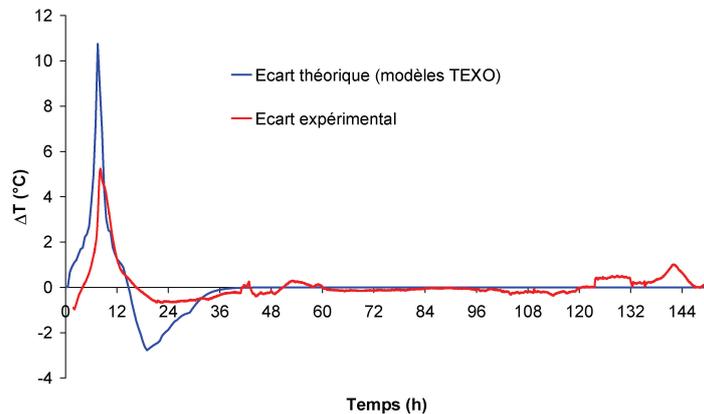


Figure 2-42 : écarts de température au point M4 (0,27 m) entre les poutres P2 et P1

2.2.4.5 Répétabilité du traitement thermique

La Figure 2-43 représente la réponse thermique au point M4 (à 0,27 m de la face supérieure) des trois poutres P2, P3 et P4 coulées avec la formule R1. Ces enregistrements de température montrent un comportement global quasi-identique, et ce malgré des états thermiques initiaux variables imputables aux différences de température ambiante au moment des différents coulages.

La Figure 2-44 fait état des écarts de température au point M4 pour ces trois corps d'épreuve. Conformément aux attentes, les écarts sont relativement conséquents en début de cure, période durant laquelle l'influence de la température initiale se fait le plus ressentir. Par la suite, ces écarts diminuent au fur et à mesure que la température de cure augmente. Le critère de répétabilité de $\pm 1^\circ\text{C}$ d'un corps d'épreuve à un autre en phase de palier fixé par le cahier des charges est ainsi satisfait.

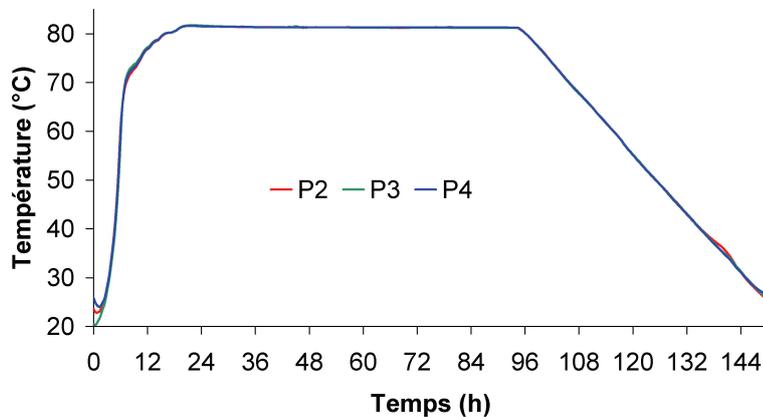


Figure 2-43 : réponse thermique des poutres P2, P3 et P4 au point M4

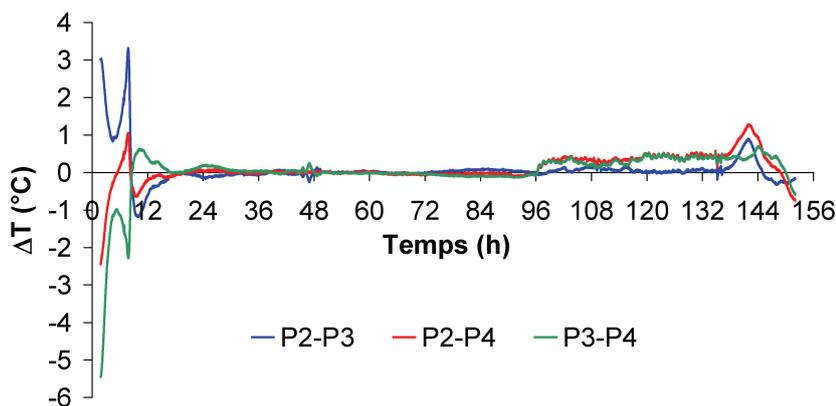


Figure 2-44 : écarts de température entre les poutres P2, P3 et P4 au cours de la cure thermique

2.2.4.6 Prévention de la lixiviation des alcalins

La cure thermique étant réalisée en eau, il existe un risque de lixiviation des alcalins, espèces chimiques qui influent de manière importante sur le développement de la RSI (*Taylor et al. 2001*). Cette lixiviation est potentiellement plus importante en phase de refroidissement où l'injection d'eau froide dans le bain de cure thermique est nécessaire pour assurer une vitesse de refroidissement suffisante (cf. section 2.2.4.1.1) ce qui induit un renouvellement de l'eau environnant les corps d'épreuve. Il a donc été décidé d'évaluer cette lixiviation en dosant les alcalins à cœur et en surface d'éprouvettes 11-22 soumises à la cure thermique et protégées par différents systèmes : capuchon plastique, textile de cure Zemdrain[®] et sac plastique (cf. Figure 2-45). Les résultats de ces essais sont donnés par la Figure 2-46. La méthode de dosage mise en œuvre est identique à celle exposée en section 1.2.2.4.1.

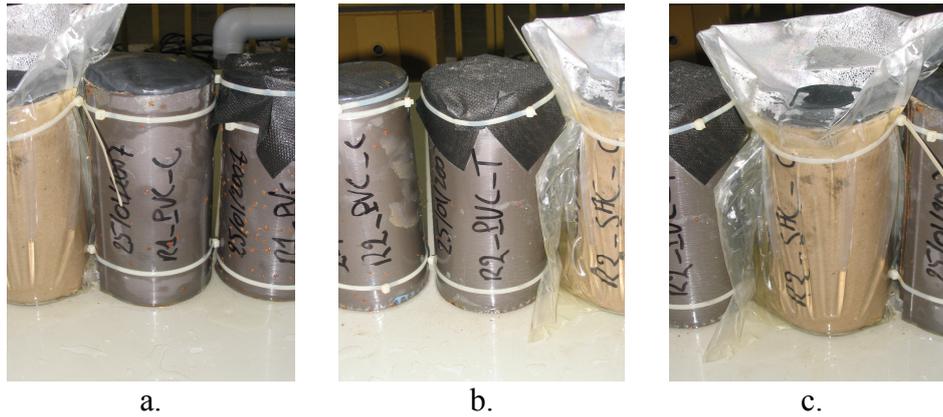


Figure 2-45 : protections contre la lixiviation testées (a. capuchon plastique ; b. textile de cure ; c. sac plastique)

On observe globalement des teneurs en alcalins des différents bétons plus importantes que celles visées théoriquement. Ceci est en accord avec la mise en évidence d'une teneur en alcalins du lot de ciment utilisé plus élevée que la teneur moyenne indiquée par la fiche technique du cimentier.

La comparaison des dosages en surface et des dosages à cœur semble indiquer que la meilleure solution de protection vis-à-vis de la lixiviation est le textile de cure Zemdrain® (approvisionné auprès de la société Max Frank GmbH & Co, Leibfling, Allemagne) qui ne montre pas de lixiviation pour les formules R1 et R2. Une légère lixiviation est détectée pour la formule NR. Toutefois, il est à noter que pour de faibles teneurs en alcalins comme celles dosées pour cette formule, les valeurs déterminées sont proches de l'incertitude de la méthode de dosage (0,1 % soit 0,4 kg/m³).

A la lumière de ces résultats, il a été décidé de protéger l'ensemble des corps d'épreuve fabriqués pour cette étude (éprouvettes et poutres) par le textile Zemdrain® lors de la cure thermique.

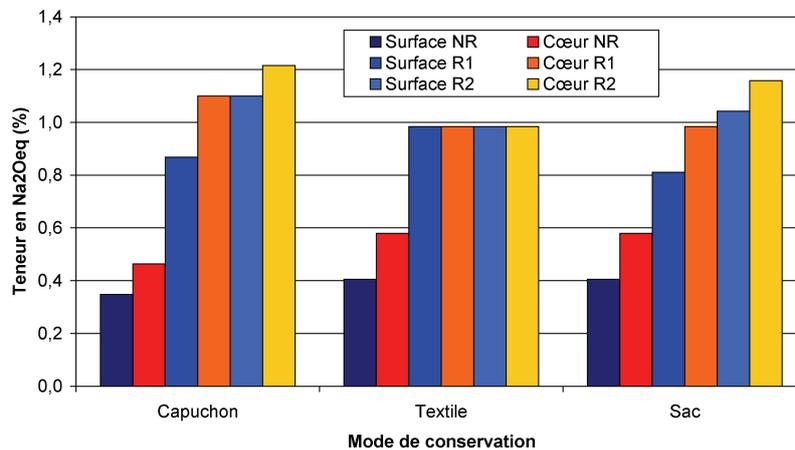


Figure 2-46 : évaluation de la lixiviation des alcalins après cure thermique pour différents solutions de protection

2.2.5 Conclusions

Cette phase de qualification a permis de s'assurer de la bonne répétabilité de la cure thermique d'une fabrication à une autre, quelle que soit la composition et/ou les dimensions des corps d'épreuve considérés. L'étude bibliographique a en effet mis en

évidence la nécessité de maîtriser ce paramètre afin de s'assurer d'un potentiel de gonflement d'origine thermique similaire pour tous les corps d'épreuve, élément nécessaire à la comparaison des comportements expansifs par la suite.

La présente section a permis de mettre au point et de vérifier la pertinence d'un traitement thermique représentatif des conditions de maturation d'une pièce massive de béton après coulage. Après une phase de chauffe de 24 heures dont les vitesses d'échauffement sont calées sur le dégagement de chaleur du matériau R1 en conditions adiabatiques, on applique un palier de température de 81°C durant 72 heures. Le traitement est achevé par une phase de refroidissement de 56 heures à une vitesse de -1°C/h jusqu'à une température de 25°C. Le traitement thermique est réalisé en eau à l'aide d'un dispositif spécifiquement conçu pour ces expérimentations.

Une vérification théorique de la pertinence de ce procédé a été effectuée par le biais de modélisations de traitement thermique de corps d'épreuve de géométries et de compositions différentes. Les simulations ont été effectuées à l'aide du module TEXO du code éléments finis CESAR-LCPC. En particulier, il a été vérifié que l'histoire thermique en phase de palier est reproductible à $\pm 1^\circ\text{C}$, quel que soit le corps d'épreuve considéré.

La vérification expérimentale du procédé a confirmé les prédictions des modèles. L'approche théorique et l'approche pratique fournissent des résultats concordants, ce qui confirme l'intérêt d'une validation numérique avec des outils tels que TEXO. Des écarts ont toutefois été mis en évidence et sont attribués aux difficultés d'estimation des états thermiques initiaux, des capacités calorifiques des différents éléments ou des coefficients d'échange. Enfin, différentes techniques de protection vis-à-vis de la lixiviation ont été testées. La solution du textile de cure Zemdrain[®] s'est avérée la plus adaptée à notre application et a été retenue dans le cadre de cette étude.

2.3 Qualification des moyens expérimentaux

2.3.1 Suivis dimensionnels

2.3.1.1 Essais sur éprouvettes

2.3.1.1.1 Suivi dimensionnel par extensométrie à pointeaux – essais de gonflement libre

Les déformations des éprouvettes de gonflement libre sont suivies par extensométrie à pointeaux : les bases de mesure sont matérialisées par des pastilles métalliques (indifféremment dénommées « plots » ci-après) percées d'un trou conique et collées sur le corps d'épreuve à mesurer à l'aide d'une « barre étalon » : ces réservations coniques permettent de venir placer des pointes jouant sur la position d'un extensomètre par le biais d'un système de renvoi mécanique. L'estimation de l'allongement est obtenue en comparant la mesure obtenue sur une barre étalon à celle obtenue sur l'éprouvette (cf. Figure 2-47).

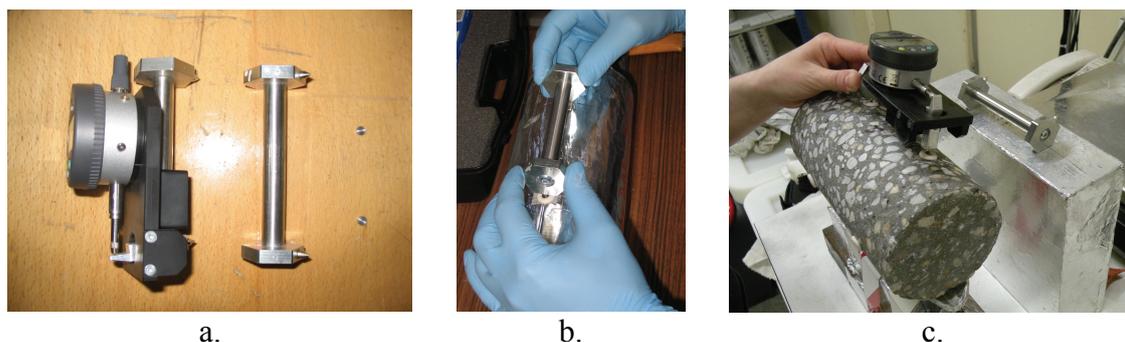


Figure 2-47 : extensométrie à pointeaux (a. extensomètre, barre étalon et plots de mesure ; b. collage des plots ; c. mesure dimensionnelle sur carotte de béton)

Afin d'obtenir des données statistiquement représentatives, chaque éprouvette est équipée de trois bases de mesure disposées à 120° (Fasseu 1997, Larive 1998, Pavoine & Divet 2007, Pavoine & Divet 2009), la déformation d'une éprouvette étant la moyenne des déformations de chaque base. Pour chaque base, on réalise trois mesures dimensionnelles successives à chaque mesure (cadence de suivi hebdomadaire) afin de diminuer l'incertitude du résultat. L'incertitude de mesure des gonflements est évaluée à $20,6 \mu\text{m/m}$ pour une déformation de 1,5 % soit une incertitude relative de 0,14 %. On trouvera en Annexe 3 le détail du calcul d'incertitude.

Devant les grandes déformations mesurées et les fissurations de corps d'épreuve parfois importantes, la colle de fixation des plots peut céder. Dans ce cas de figure, une base de mesure peut être recollée pour poursuivre le suivi dimensionnel de l'éprouvette concernée. Néanmoins, il est nécessaire d'introduire dans les données collectées un décalage correspondant à la mesure dimensionnelle qu'un opérateur aurait obtenue si le plot considéré ne s'était pas décollé. En d'autres termes, on considère la mesure dimensionnelle réalisée après collage de la nouvelle base de mesure comme nouvelle référence à laquelle on ajoute la mesure dimensionnelle déterminée avant décollage. Lorsque cette dernière information n'est pas à disposition (i.e. lorsque le plot s'est décollé lors de la conservation du corps d'épreuve entre deux séances de mesure), cette valeur est estimée sur la base de la dernière mesure disponible en considérant une évolution dimensionnelle de l'éprouvette durant la période où l'information vient à manquer identique à celle des corps d'épreuve issus du même lot et soumis au même protocole de mesure.

Cette démarche d'instrumentation et de traitement de données a également été appliquée avant basculement de conservation des éprouvettes de gonflement libre soumises à un apport hydrique (cf. section 1.2.2.1.1) : ces corps d'épreuve ont développé des gonflements particulièrement importants. Ainsi, avant de les placer en séchage, il a été décidé de renouveler entièrement leur instrumentation afin de disposer de bases de mesure propres et saines pour la suite des expérimentations.

2.3.1.1.2 Suivi dimensionnel par robot semi-automatique – essais de gonflement sous contraintes

Les déformations radiales et axiales des éprouvettes de gonflement sous contraintes sont suivies à l'aide de deux robots de mesures dimensionnelles (cf. Figure 2-48). Ces robots peuvent être adaptés à toutes les éprouvettes, en bâtis de fluage ou non et fonctionnent sur le même principe que ceux présentés par (Multon 2004). Une qualification

de chacun des robots a été effectuée et aboutit à un écart type de répétabilité de l'ordre de $10 \mu\text{m}/\text{m}$ pour les mesures de déformations radiales et de $5 \mu\text{m}/\text{m}$ pour les déformations longitudinales, incertitudes similaires à celles obtenues pour (Multon 2004). On trouvera en Annexe 3 une description détaillée de la qualification des robots et des procédures de mesure appliquées.

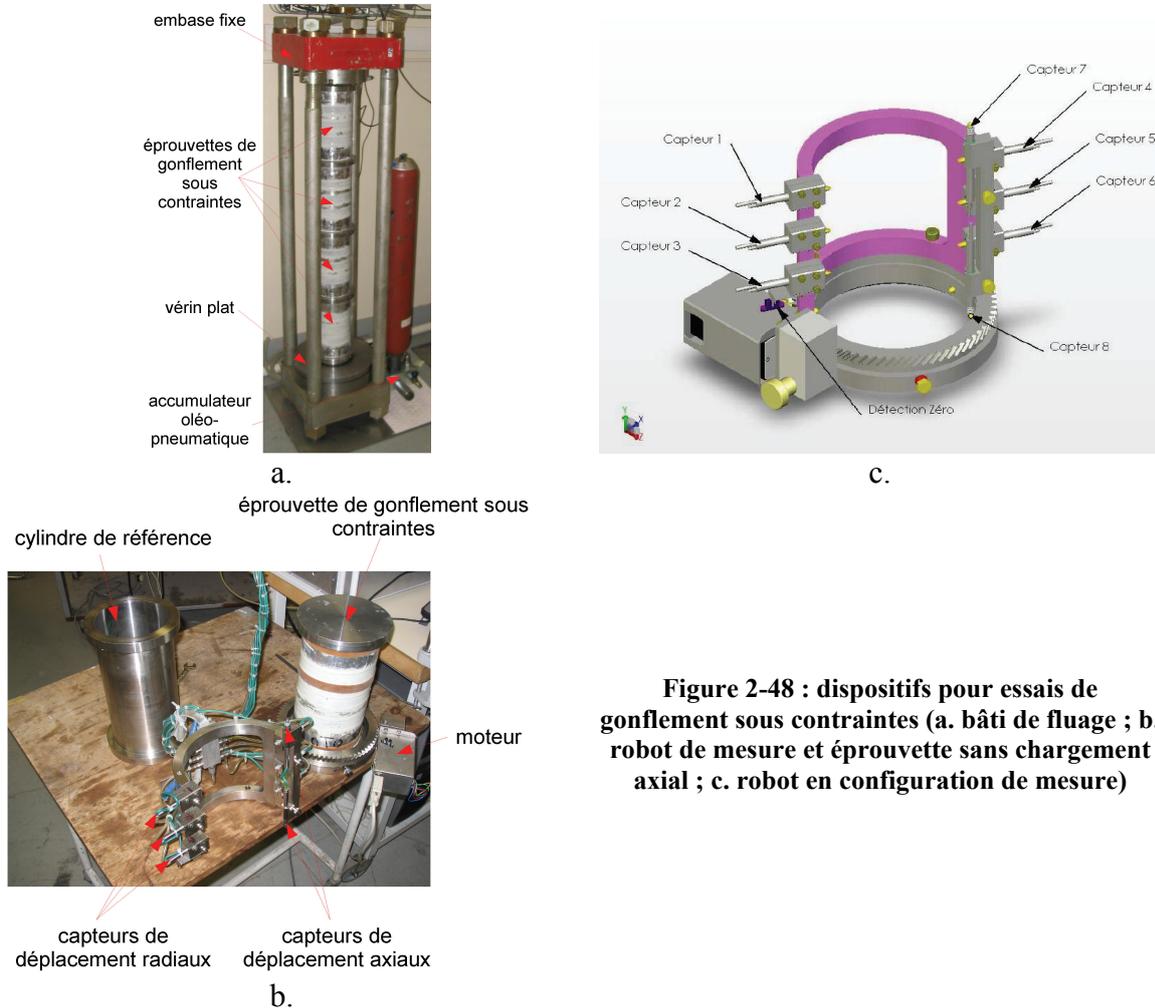


Figure 2-48 : dispositifs pour essais de gonflement sous contraintes (a. bâti de fluage ; b. robot de mesure et éprouvette sans chargement axial ; c. robot en configuration de mesure)

Ces dispositifs expérimentaux se révèlent être particulièrement délicats à manipuler et nécessitent une attention particulière pour assurer des mesures fiables. En particulier, les encombrements importants dans les bâtis de fluage induisent des frottements des tirants verticaux sur les capteurs qui peuvent les détériorer (en particulier au niveau des connexions). Ainsi, les capteurs doivent être régulièrement changés pour assurer des mesures fiables et précises.

Les essais de gonflement sous contraintes sont réalisés sur des corps d'épreuve conservés sous scellement hydrique. Les scelllements hydriques sont en règle générale confectionnés à l'aide d'aluminium autoadhésif (Toutlemonde & Le Maou 1996). Néanmoins, la caractère malléable de ce scellement le rend inutilisable dans le cadre de mesures dimensionnelles précises. Par conséquent, des résines époxy faisant office de pare vapeur sont appliquées au niveau des zones de mesure (une couche d'accroche Eponal 376 suivie d'un traitement de surface à l'aide d'une colle bi-composant de type X60 [fournisseur HBM] permettant de colmater les bulles d'air emprisonnées en surface et enfin deux couches de protection Eponal 371 faisant également office de colle pour les

embases métalliques des faces supérieure et inférieure de chaque corps d'épreuve – cf. Figure 2-49).

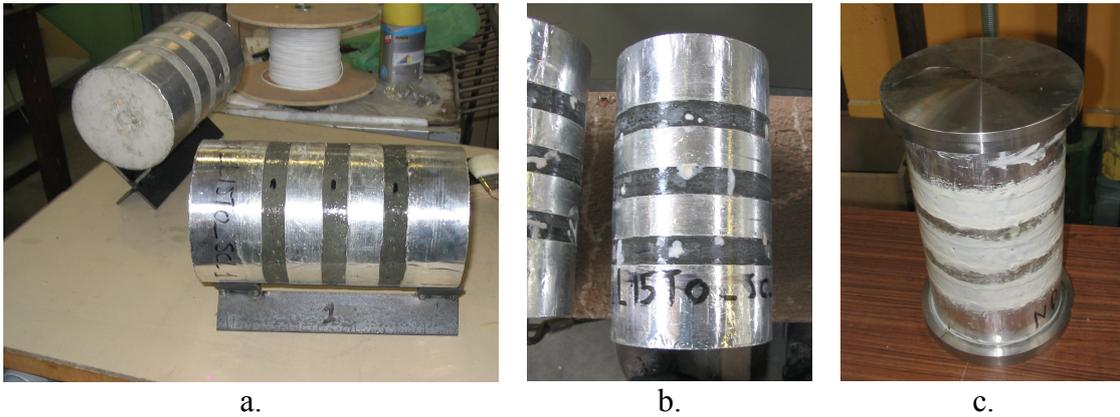


Figure 2-49 : éprouvettes de gonflement sous contraintes (a. pose de la couche d'accroche ; b. traitement de surface ; c. pose des couches d'étanchéité et collage des embases métalliques)

La Figure 2-50 compare les suivis massiques des éprouvettes de gonflement libre conservées sous trois couches d'aluminium autoadhésif (Toutlemonde & Le Maou 1996) et des éprouvettes de gonflement sous contraintes protégées de la dessiccation par le scellement mixte décrit dans cette section. On observe que les éprouvettes en béton présentent des pertes de masse similaires, quelle que soit la technique de scellement considérée, indiquant ainsi le bon fonctionnement de la résine époxy. En revanche, on note des pertes de masse moins importantes pour les éprouvettes étreintes par les anneaux d'acier : ces derniers jouent le rôle de pare-vapeur et permettent une dessiccation moindre des corps d'épreuve.

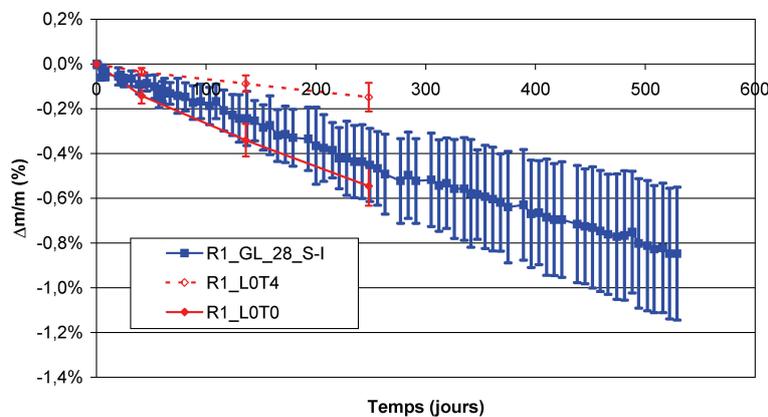


Figure 2-50 : comparaison des suivis massiques des éprouvettes R1 conservées sous scellement aluminium intégral et sous scellement mixte aluminium/résine époxy

Afin de s'affranchir des tassements d'interface initiaux, le point zéro de l'ensemble des mesures est réalisé six jours après la mise en charge des bâtis (mise en charge effectuée à 41 jours d'âge du béton). Ceci permet également de disposer de suffisamment de temps pour mettre au point les réglages des dispositifs d'instrumentation avant le lancement de la phase de suivi. On évalue ainsi uniquement le comportement de fluage à long terme des matériaux. Les mesures sont réalisées avec une fréquence hebdomadaire.

2.3.1.2 Essais sur poutres

2.3.1.2.1 Instrumentation externe

2.3.1.2.1.1 Capteurs

Le suivi des déformations globales des poutres est assuré par l'utilisation d'extensomètres à corde vibrante sans raideur à excitation répartie (*Joly 1999*) de grande base (2980 mm et 2640 mm) ainsi que de capteurs LVDT munis de barres de renvoi mécanique servant de base de mesure. Les systèmes de fixation des cordes vibrantes sont repris de l'étude de (*Multon 2004*). Des systèmes de fixation spécifique ont été mis au point pour les capteurs LVDT (cf. Figure 2-52.a et b). Si le principe des éléments de fixation de (*Multon 2004*) a été repris, il a néanmoins dû être adapté pour pouvoir réaliser des mesures jusqu'à une amplitude de déformation de 1,5 %. La Figure 2-51 illustre le dispositif de fixation : les bases de mesure sont maintenues sur la structure grâce à un système d'équerre et de plaque de fermeture (Figure 2-51.a) vissées sur une plaque de réglage (Figure 2-51.b) comportant une série de trous filetés permettant de replacer les capteurs dans leur domaine de fonctionnement lorsque les gonflements deviennent trop importants.

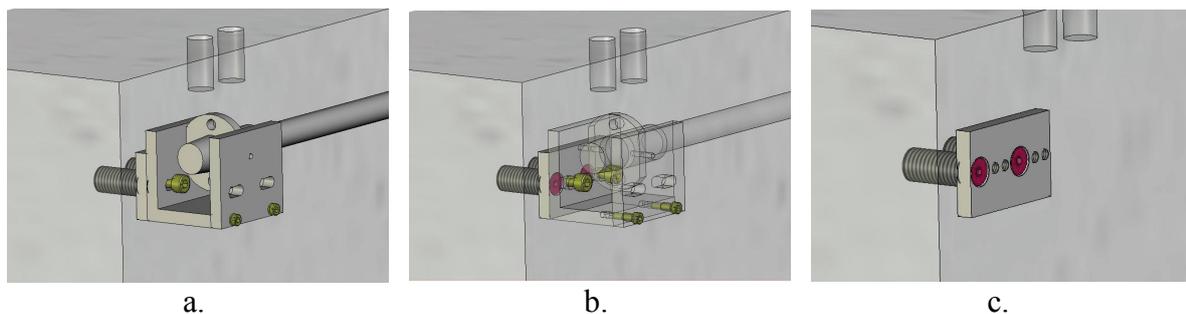


Figure 2-51 : dispositif de fixation des bases de mesure horizontale (a. vue générale après fixation sur une poutre ; b. illustration de la fixation ; c. plaque seule avec trous filetés pour réglage de position)

Le suivi des déformations locales du béton sur les faces externes des corps d'épreuve est assuré grâce à des cordes vibrantes de base 85 mm (cf. Annexe 1). Les pièces de fixation des capteurs sont maintenues en position sur les poutres grâce à des inserts filetés noyés dans les structures au moment du coulage (cf. Figure 2-52.e et f).

Le suivi des flèches de chaque poutre est réalisé à l'aide de 10 capteurs de déplacement (Solartron DP10) par poutre (cinq capteurs par face). Ces capteurs sont solidaires de règles parallèles aux faces latérales des poutres et fixes par rapport à elles. Le mouvement relatif de la poutre par rapport à la règle fixe permet la mesure de flèche (cf. Figure 2-52.c et d).

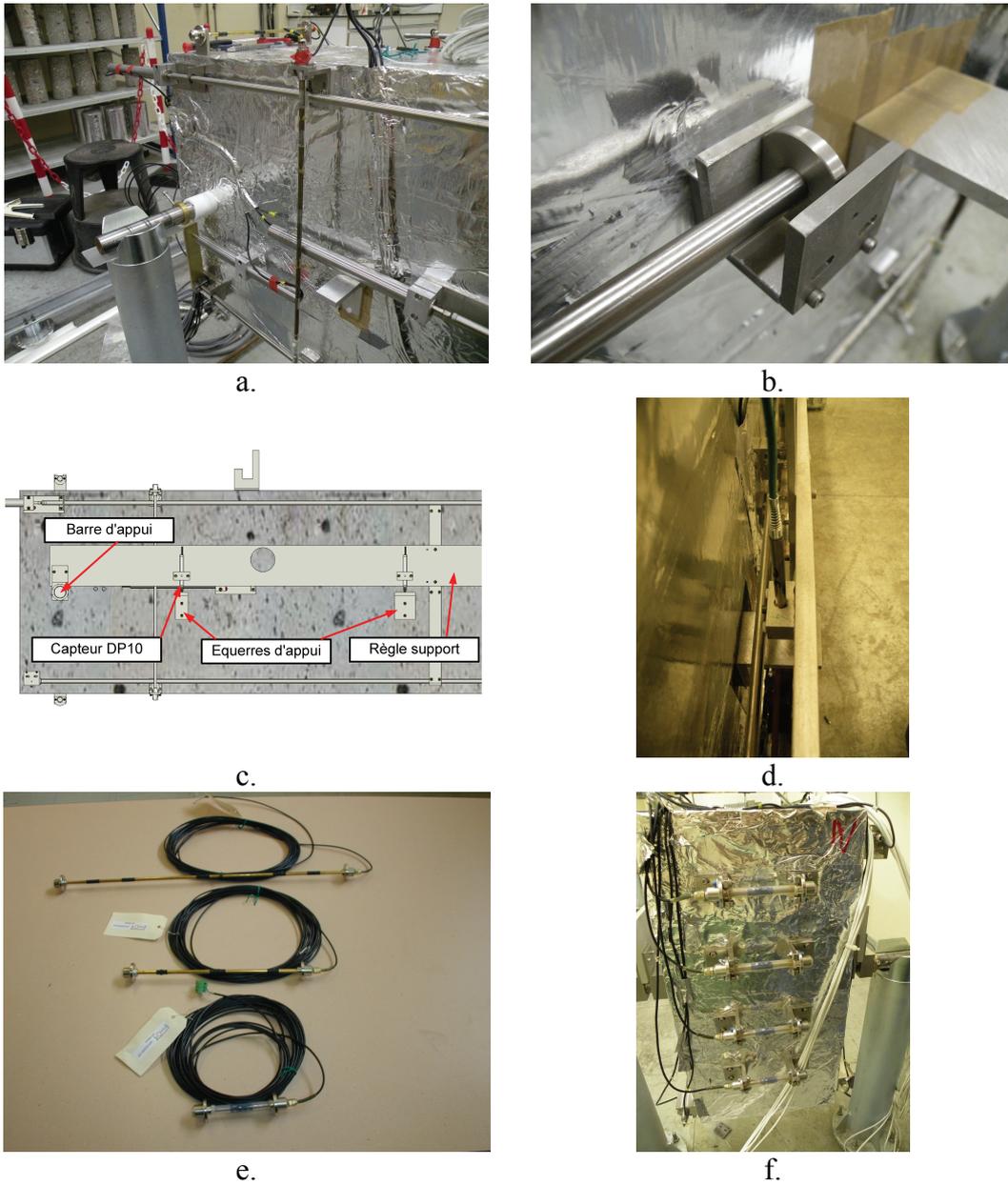


Figure 2-52 : instrumentation des poutres
 a. dispositifs de fixation des capteurs LVDT
 b. dispositif de fixation des bases de mesure LVDT
 c. dispositif de mesure de flèche (face)
 d. dispositif de mesure de flèche (dessus)
 e. capteurs à corde vibrante
 f. cordes vibrantes 85 mm (face nord d'une poutre)



Figure 2-53 : vue générale de P3 après instrumentation

2.3.1.2.1.2 Interrogation des capteurs

Lors de la phase d'instrumentation, des problèmes de parasites électriques ont été rencontrés. Les différentes technologies de capteurs mises en œuvre dans cette étude nécessitent l'utilisation de deux types de centrale différents, l'un étant dédié à l'acquisition des cordes vibrantes, l'autre étant destiné à l'enregistrement des capteurs de flèche, des extensomètres LVDT et des jauges de déformation. Tous ces capteurs sont en contact électrique du fait de la présence du scellement aluminium sur les faces latérales de la poutre (cf. Figure 2-53). La coexistence des deux centrales dans un même « circuit » électrique engendre des parasites qui en l'absence de précautions rendent inutilisables les dispositifs à cordes vibrantes. Une mise à la masse commune de ces deux centrales n'ayant pas permis de résoudre ce problème, les deux circuits ont été isolés l'un de l'autre pour permettre l'instrumentation des poutres.

Au total, quatre centrales d'acquisition différentes ont été mises en œuvre dans le cadre de ce programme (deux centrales pour les cordes vibrantes, une centrale pour les capteurs de déplacement et les jauges d'extensométrie et une centrale pour les capteurs de température/humidité).

2.3.1.2.2 Instrumentation interne

2.3.1.2.2.1 Mesure des déformations du béton

Des essais de tenue des extensomètres à corde vibrante noyés vis-à-vis de la cure thermique ont montré que les capteurs approvisionnés ne résistent pas aux conditions agressives qui leur sont appliquées durant le traitement thermique malgré les critères d'étanchéité et de résistance à la température déterminés par le cahier des charges lors de la conception. En particulier, la colle permettant de maintenir les aimants d'excitation des cordes sur le corps des capteurs ne résiste pas à la combinaison d'une agression thermique et chimique (cf. Figure 2-54) (tandis que la résistance à la température seule a été confirmée). Ces capteurs n'ont donc pu être utilisés en instrumentation noyée.



Figure 2-54 : diagnostic du problème des capteurs à corde vibrante après cure thermique (a. récupération du capteur ; b. déplacement d'un aimant)

Pour pallier ce problème, des jauges d'extensométrie à noyer dans le béton (dénommées jauges pain de sucre par la suite) ont été utilisées. Il s'agit de jauges résistives (fournisseur Vishay, référence EGP-5-120) noyées dans un revêtement assurant ainsi une cohésion entre la capteur et le matériau qui l'entoure (cf. Figure 2-55). Lorsque le matériau se déforme, la résistance de la jauge est modifiée proportionnellement et il est alors

possible de mesurer une déformation par calibration des capteurs. Afin d'assurer une meilleure résistance à la température, ces capteurs ont été équipés de câbles revêtus de téflon. Une qualification de ces instruments pour les applications de cette étude est donnée en Annexe 3.

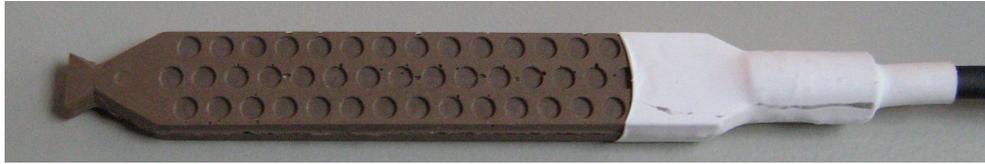
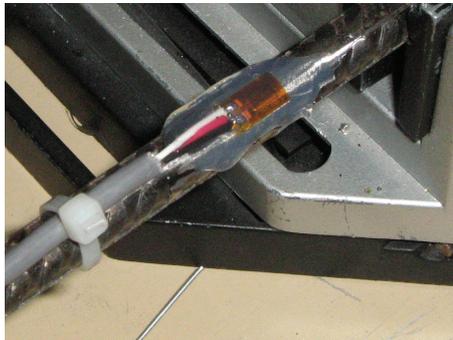


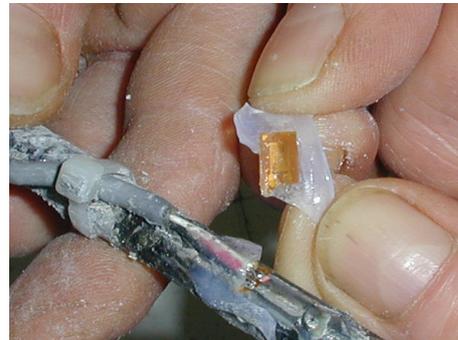
Figure 2-55 : jauge pain de sucre

2.3.1.2.2 Mesure des déformations des aciers

Deux technologies de fixation des jauges de déformation sur support en acier existent : les jauges collées et les jauges soudées. Les premières présentent l'avantage d'être peu intrusives de par leur petite taille et leur flexibilité qui nécessite uniquement de meuler les verrous des armatures pour être mises en place (cf. Figure 2-56.a.). En contrepartie, leur liaison chimique avec les aciers est vulnérable aux conditions agressives régnant au sein des corps d'épreuve lors de la cure thermique. Les secondes ne présentent pas cet inconvénient puisqu'elles sont liées mécaniquement aux armatures par soudage. En revanche, outre leur encombrement plus important, leur mise en place ne peut se faire qu'en réalisant un méplat sur les aciers, créant ainsi une amorce de rupture (cf. Figure 2-56.c.).



a.



b.



c.



d.

Figure 2-56 : jauges d'extensométrie pour aciers

a. colle classique + silicone avant cure

c. jauge soudée avant protection

a. colle classique + silicone après cure

d. jauge soudée sur armature Ø32 après protection

De nombreuses solutions combinant 4 types de jauge, 5 types de colle, un vernis isolant, 2 types de silicone et 2 types de revêtement de protection ont été testées afin de trouver une solution technique permettant d'instrumenter les ferrailages des poutres (cf. Annexe 3). La quasi-totalité des solutions utilisant des jauges collées s'est montrée inefficace sous l'effet de l'action combinée de la haute température et des conditions chimiques agressives : on observe un décollement de la trame de la jauge (cf. Figure 2-56.b.). Au contraire, la solution des jauges soudées s'est révélée la plus pertinente en termes de liaison mécanique avec l'armature, conformément à nos attentes. Toutefois, cette solution ne doit être utilisée que ponctuellement compte tenu de son encombrement (cf. Figure 2-56.d.). C'est cette solution qui a été choisie pour l'instrumentation des ferrailages des poutres armées. Devant l'encombrement de ces éléments, seuls les aciers longitudinaux de diamètre supérieur à 16 mm ont été instrumentés (section médiane des poutres concernées).

2.3.1.2.3 Traitement des données

Les cinétiques de réaction de gonflement interne peuvent se révéler particulièrement rapides. Ainsi, pour le cas des poutres non armées, on a pu assister à une augmentation très rapide des déformations conduisant certains capteurs à être placés en dehors de leur course d'utilisation sans que l'expérimentateur ne puisse s'en rendre compte. D'autre part, certains dysfonctionnements des centrales d'acquisition ont pu conduire à la perte de données durant plusieurs jours. Enfin, les activités humaines dans ou à proximité des locaux de stockage des corps d'épreuve conduisent parfois à l'observation de « sauts » des valeurs mesurées correspondant à un choc ou une vibration transmis aux capteurs et aboutissant à un décalage instantané de la grandeur mesurée. Ces phénomènes impliquent donc la nécessité de recalibrer les données mesurées afin de les rendre exploitables : en d'autres termes, il est nécessaire d'introduire un décalage intermédiaire pour faire correspondre les données collectées juste avant le dysfonctionnement considéré à celles collectées juste après (cf. Figure 2-57). Lors de la présentation des suivis dimensionnels des poutres, les périodes ayant nécessité de telles extrapolations sont indiquées par une courbe grise (cf. Figure 2-58).

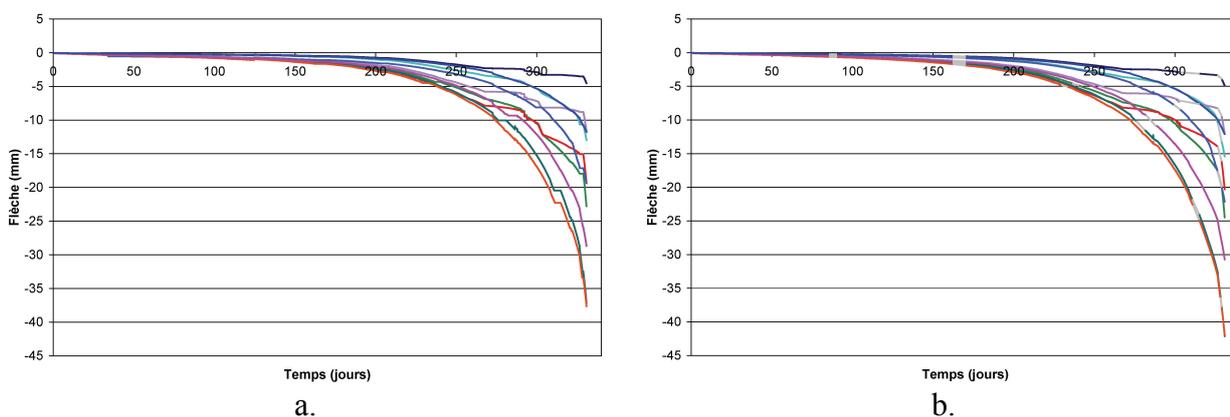


Figure 2-57 : exemple de données a. avant traitement b. après traitement

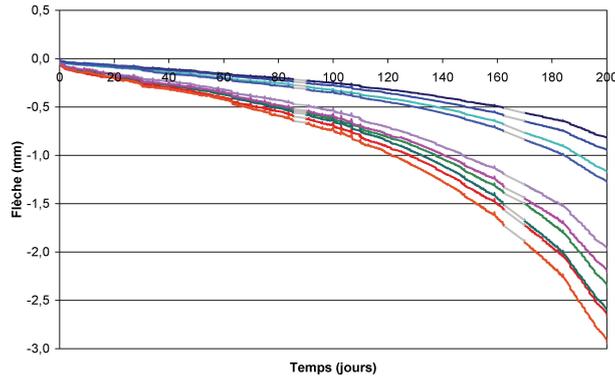


Figure 2-58 : repérage des zones ayant fait l'objet d'une extrapolation lors du traitement de données

2.3.2 Contrôle des conditions de conservation et suivi hydrique

2.3.2.1 Conditions de conservation

2.3.2.1.1 Salle à « 38°C / 30 % HR »

La salle de stockage à atmosphère régulée développée dans le cadre des travaux de (Multon 2004) a été utilisée pour l'ensemble du programme expérimental. Ses caractéristiques n'ont pas été modifiées. Un suivi des conditions de stockage a été mis en place à l'aide de capteurs d'humidité et de température de marque Sensirion. Ceux-ci sont répartis en quatre points de la salle de stockage représentatifs des lieux où sont entreposés les corps d'épreuve. La température de la salle est ainsi régulée à $37 \pm 1^\circ\text{C}$ (écart type des mesures inférieur à $0,6^\circ\text{C}$). Son humidité relative est maintenue à $36 \pm 2\%$ (écart type des mesures inférieur à 1%). Il est à noter que l'humidité relative initialement visée était de 30% . Toutefois, pour des humidités aussi faibles, il est plus compliqué de maintenir l'homogénéité de l'atmosphère de la salle de stockage. Il a donc été décidé de conserver cette valeur légèrement plus élevée pour laquelle l'homogénéité est plus aisément maintenue. Ces conditions de stockage sont maintenues stables et ce malgré des perturbations régulières nécessaires à la réalisation des mesures (ouverture des réacteurs à 100% de HR par exemple).

2.3.2.1.2 Réacteurs à 100 % HR

(Multon 2004) a montré que la régulation et l'homogénéisation d'une salle à 38°C et 100% d'humidité relative est complexe et difficile à garantir. Pour remédier à ce problème compte tenu d'un nombre relativement limité de corps d'épreuve à conserver dans ces conditions, deux réacteurs dont l'humidité est maintenue à 100% HR ont été développés pour stocker les éprouvettes de gonflement libre (cf. Figure 2-59). Il s'agit de cylindres de Plexiglas[®] étanches dans lesquels une circulation d'eau distillée sur la paroi intérieure vient saturer l'air en vapeur d'eau et ainsi atteindre une humidité relative de 100% .

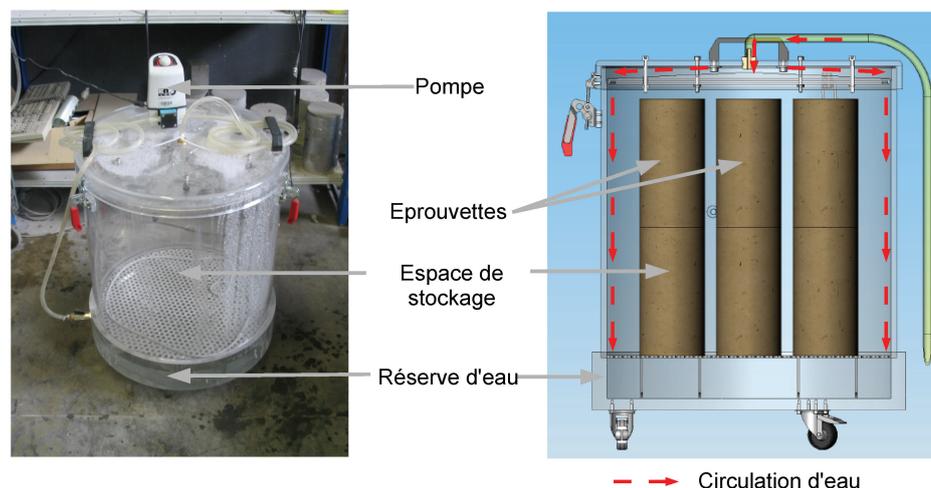


Figure 2-59 : réacteurs à 100 % HR

2.3.2.1.3 Scellement hydrique

Les corps d'épreuve à protéger de la dessiccation sont majoritairement conservés sous aluminium autoadhésif (trois couches en période de stockage) dont l'efficacité a été évaluée par (Toutlemonde & Le Maou 1996). Les éprouvettes de gonflement sous contraintes font l'objet d'une protection particulière décrite en section 2.3.1.1.2.

2.3.2.1.4 Conservation en eau

Les corps d'épreuve conservés en eau sont immergés dans des bacs remplis d'eau de ville et munis d'un couvercle, entreposés dans la même salle à 38°C/30 % de HR. Chaque type de corps d'épreuve est conservé dans un bac qui lui est propre afin d'éviter les contaminations qui pourraient provoquer l'apparition de phénomènes parasites. Ce type de conservation peut induire une lixiviation des alcalins relativement conséquente, le volume d'eau étant relativement important en comparaison du volume de béton (même si la limitation du volume d'eau et de son renouvellement a fait l'objet d'une attention particulière). Néanmoins, des stockages dans des volumes d'eau tels que ceux préconisés par (Pavoine & Divet 2007) s'avèrent délicats à mettre en œuvre pour un grand nombre de corps d'épreuve. Cette solution n'a donc pas été retenue pour cette étude. La lixiviation des alcalins en phase de stockage a été quantifiée et est présentée dans le Chapitre 3.

2.3.2.2 Suivi hydrique des poutres

2.3.2.2.1 Capteurs d'humidité relative

La mise en place de capteurs d'humidité relative noyés a pour objectif d'évaluer la progression du front de séchage puis d'humidification dans les poutres tout au long du programme expérimental. Ces capteurs à semi-conducteur (SHT75 Sensirion, précision de ± 4 % à 100 % HR) ont fait l'objet d'une protection spéciale pour assurer leur tenue à la cure thermique (cf. Figure 2-60). Le capteur est protégé par un tube en acier fermé par une pastille de Gore-Tex[®] du côté de la partie sensible, l'autre extrémité étant colmatée par un

silicone résistant à la température, protégeant ainsi les connexions (au préalable recouvertes de vernis de protection isolant). Le Gore-Tex® empêche la destruction du capteur par intrusion de béton mais permet la mesure de HR en autorisant les échanges de vapeur d'eau (*Grasley et al. 2006*).

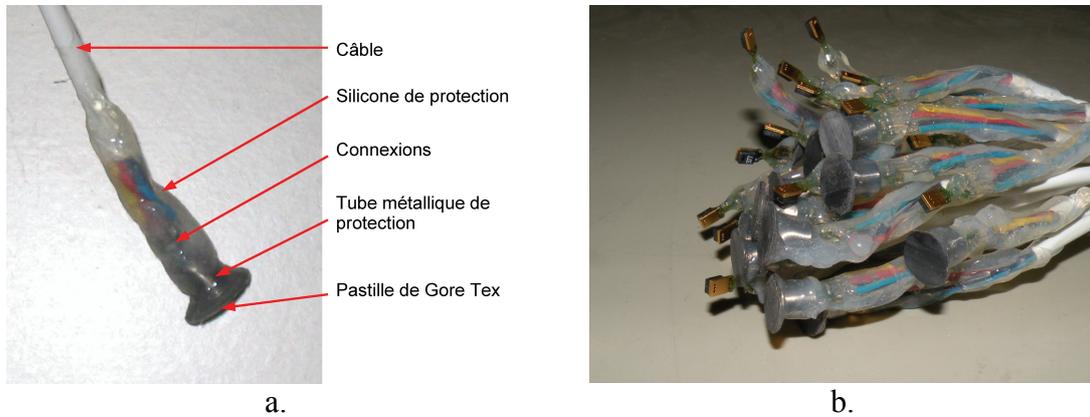


Figure 2-60 : capteurs de température et d'humidité relative Sensirion (a. détail sur le mode de préparation ; b. série de capteur après fabrication [avec ou sans protection Gore-Tex])

A l'issue de la cure thermique, la fonction de mesure de l'humidité de certaines voies s'est révélée inutilisable malgré les efforts de protection mis en œuvre (humidité mesurée erronée). Afin de pallier ce problème, une solution de remplacement a été mise en œuvre (perçage de la poutre jusqu'au cœur de la poutre, mise en place d'un nouveau capteur et colmatage du trou de positionnement par un bouchon silicone + aluminium autoadhésif). Cette solution s'est révélée bien adaptée pour le remplacement des voies défectueuses.

Cependant, le séjour prolongé de ces capteurs à des HR proches de 100 % a conduit à une dérive des grandeurs mesurées : après plusieurs mois de suivi, on mesure des valeurs d'humidité relative de l'ordre de 115 %. Dès lors, ces données deviennent inexploitable : quantitativement, il est évident que l'expérimentateur ne peut pas se prononcer sur l'humidité interne du matériau ; qualitativement, une augmentation de l'humidité relative durant plusieurs mois dans la partie supérieure qui devrait rapidement être affectée par le front de séchage semble étrange et suggère une réponse biaisée du capteur correspondant. Aucune solution palliative n'a pu être trouvée pour ce problème.

2.3.2.2.2 *Suivi de la teneur globale en eau : pesée*

Comme pour (*Multon 2004*), le suivi de la teneur globale en eau est réalisé à l'aide d'un banc de pesage différentiel (cf. Figure 2-61). Le principe de fonctionnement de celui-ci est exposé dans (*Multon 2004*).

Des essais de qualification ont été réalisés et conduisent à l'évaluation d'une incertitude de répétabilité de 9 grammes sur 1 tonne, valeur équivalente à celle déterminée par (*Multon 2004*). On trouvera en Annexe 3 le détail des opérations de qualification.

Cette technique de suivi de masse globale des poutres s'est révélée bien adaptée au cas de la RSI. Bien que les variations de masse soient bien plus importantes dans le cas de cette pathologie que dans celui de structures atteintes de RAG, les suivis réalisés se sont révélés précis et répétables au cours du temps (périodicité de mesure de l'ordre d'un mois). La principale source d'incertitude correspond à la quantité d'eau liquide encore présente à

la surface des corps d'épreuve, quantité fonction de l'essuyage de l'eau de ruissellement par un opérateur (l'objectif étant d'éponger la structure sans la sécher).



Figure 2-61 : banc de pesée (a. pesée d'une poutre ; b. pesée de la poutre étalon)

2.3.2.2.3 *Suivi de la teneur locale en eau : méthode de gammadensimétrie*

En complément du suivi de la teneur globale en eau des poutres, un suivi de teneur locale en eau est réalisé par méthode de gammadensimétrie (cf. Figure 2-62) : à l'aide d'une source de rayonnement ionisant, on suit au cours du temps l'évolution de l'intensité du faisceau transmis transversalement à la poutre à travers une zone cylindrique de 1 cm de diamètre, par rapport à l'intensité du faisceau à vide. L'évolution de ce paramètre permet d'évaluer localement la variation relative de masse (loi de Beer-Lambert). Le banc de gammadensimétrie est muni d'un dispositif de positionnement automatique permettant d'évaluer les variations relatives de masse en trois sections transversales différentes, d'une profondeur de 10 mm à 290 mm par rapport à la face supérieure de la poutre. Les variations en chaque profondeur sont estimées en moyennant les résultats de chacune des trois sections.

Une campagne de répétabilité a été menée en réalisant six mesures successives (soit 90 points de mesure au total) sur une même poutre en béton dont les échanges hydriques avec l'extérieur sont entièrement empêchés par un scellement aluminium. On obtient une incertitude de répétabilité de 0,18 % (incertitude absolue en variation relative de masse) sur la détermination de la variation relative de masse d'une zone de mesure (cylindre de 1 cm de diamètre et 25 cm de longueur).



Figure 2-62 : mesure de gammadensimétrie sur une poutre

D'un point de vue théorique, cette technique de mesure non destructive de la teneur en eau se révèle pertinente dans le cadre de nos expérimentations. Néanmoins, d'un point de vue pratique, elle se révèle particulièrement sensible aux variations de positionnement du banc de mesure. L'utilisation prolongée du dispositif (périodicité de mesure de l'ordre de 15 jours initialement) a mis en évidence l'existence de points de mesure aberrants attribués à des problèmes de positionnement : en cas de variation de la position du banc entre deux mesures sur un même point de la structure, le cylindre de matériau intersecté par le faisceau de particules est modifié et conduit à évaluer une variation de masse biaisée. De telles variations de positionnement ont été effectivement observées sous l'effet du vieillissement du vérin soutenant le banc (rotations non contrôlées suivant l'axe vertical). Par ailleurs, les déformations considérables des structures sous l'effet des gonflements ont également conduit à un décalage du banc de gammadensimétrie par rapport aux positions initiales et ont ainsi introduit une nouvelle source d'erreur (rotation des sections sous l'effet des gonflements).

Le suivi le plus pertinent se révèle être celui de la poutre P1 (non armée, formule NR) pour laquelle les faibles évolutions dimensionnelles ont permis un bon positionnement du dispositif de gammadensimétrie. Les données correspondantes seront utilisées par la suite pour caractériser le séchage de l'ensemble des structures (cf. Chapitre 4).

3 Retour d'expérience des fabrications

3.1 Fabrications des bétons

A l'exception de la classe granulaire 10/14 du gravillon PR, les matériaux ont été approvisionnés en lots uniques afin de s'affranchir de la variabilité des caractéristiques des constituants inhérente à leur mode de fabrication. Un réapprovisionnement en gravillon PR 10/14 s'est révélé nécessaire pour la dernière fabrication.

Le Tableau 2-23 synthétise les résultats des essais sur béton frais : les fabrications de béton se sont révélées répétables (faible dispersion des résultats). Les formules R1 et R2 présentent des affaissements conformes à la cible de 10 ± 2 cm fixée par le cahier des charges de l'étude. En revanche, la formule NR présente un affaissement supérieur à cette cible imputable au changement de ciment. Ce matériau ne présentant pas de risque de ségrégation, il a été choisi de ne pas modifier la quantité d'eau de la formule pour jouer sur la valeur d'affaissement et ce afin de disposer de bétons de rapports E/C identiques.

A l'exception des éprouvettes R1_38_L, l'ensemble des fabrications a été réalisé sur le même malaxeur. Avant chaque coulage, une gâchée de graissage dont le volume est égal à la moitié de la capacité de la cuve a été réalisée afin d'assurer un gâchage des matériaux le plus répétable possible. La procédure de malaxage des matériaux a été identique pour tous les coulages et est donnée en Annexe 2.