HAL
open science

Analyse sur structures modèles des effets mécaniques de la Réaction Sulfatique Interne (RSI) du béton

Renaud-Pierre Martin

To cite this version:

Renaud-Pierre Martin. Analyse sur structures modèles des effets mécaniques de la Réaction Sulfatique Interne (RSI) du béton. Matériaux. Université Paris-Est, 2010. Français. NNT : . tel-00558200v1

HAL Id: tel-00558200

https://pastel.hal.science/tel-00558200v1

Submitted on 21 Jan 2011 (v1), last revised 7 Nov 2011 (v2)

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

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.

Tableau 2-23 : synthèse des essais sur béton frais

Date de fabrication	Corps d'épreuve	Affaissement (cm)			Air occlus (%)		
15/11/2007	**Eprouvettes de caractérisation mécanique R1**	11			2,4%		
15/11/2007	**Eprouvettes de gonflement libre R1**	9			2,5%		
03/04/2008	**Eprouvettes de gonflement sous contraintes R1**	9			2,6%		
24/01/2008	**Eprouvettes de caractérisation mécanique R2**	11			2,0%		
24/01/2008	**Eprouvettes de gonflement libre R2**	9			2,1%		
28/08/2008	**Eprouvettes de gonflement sous contraintes R2 + R3**	12			1,8%		
28/02/2008	**Eprouvettes de caractérisation mécanique NR**	12			2,6%		
28/02/2008	**Eprouvettes de gonflement libre NR**	18			2,3%		
02/10/2008	**Eprouvettes de gonflement sous contraintes NR + BT**	19			2,2%		
15/05/2008	**P1**	17	16	15	2,3%	2,4%	2,8%
		16			2,5%		
19/06/2008	**P2**	8	9	8	2,3%	2,1%	2,1%
		8			2,2%		
11/12/2008	**P3**	7	9	13	2,4%	2,9%	3,0%
		10			2,8%		
24/07/2008	**P4**	9	9	9	2,3%	2,4%	2,6%
		9			2,4%		
12/02/2009	**P5**	8	11	12	1,7%	1,7%	2,2%
		10			1,9%		
19/03/2009	**P6**	12	11	10	1,6%	1,5%	1,9%
		11			1,7%		
02/04/2009	**Eprouvettes R1_38_L (lixiviation)***	6			2,5%		
-	**Moyenne R1**	**9**			**2,5%**		
-	*Ecart type R1*	*1*			*0,2%*		
-	**Moyenne R2**	**11**			**1,9%**		
-	*Ecart type R2*	*1*			*0,2%*		
-	**Moyenne NR**	**16**			**2,4%**		
-	*Ecart type NR*	*3*			*0,2%*		

* fabrication réalisée sur un malaxeur de 30 litres

La mise en œuvre des matériaux gâchés est effectuée sur une durée de l'ordre de une heure (le profil de cure thermique prévoit une fenêtre de deux heures pour pouvoir gérer d'éventuels imprévus).

Pour les cylindres 11-22 moulés, la vibration des matériaux est assurée à l'aide d'une table vibrante suivant la norme NF P 18-421 (*AFNOR 1981-a*). Les autres corps d'épreuve (poutres, blocs pour carottage d'éprouvettes de gonflement libre, éprouvettes de gonflement sous contrainte sont vibrées à l'aiguille suivant la norme NF P 18-422 (*AFNOR 1981-b*).

Figure 2-63 : fabrication d'éprouvettes de gonflement libre et de caractérisation mécanique

a. coulage de blocs pour carottage
b. éprouvettes de caractérisation mécanique
c. coulage de blocs et de cylindres 11-22
d. vibration de cylindres
e. cure d'un bloc pour carottage
f. cure de cylindres 11-22 moulés
g. cure de 28 jours sous aluminium
h. carottage d'éprouvettes de gonflement libre
i. surfaçage d'une éprouvette de gonflement libre
j. éprouvette de gonflement libre

Figure 2-64 : fabrication de poutres

a. capteurs de température et d'humidité
b. jauges pain de sucre (poutre non armée)
c. jauges pain de sucre (poutre armée)
d. remplissage du coffrage (1)
e. remplissage du coffrage (2)
f. remplissage du coffrage (3)
g. cure d'une poutre
h. protection vis-à-vis de la lixiviation

Figure 2-65 : fabrication d'éprouvettes de gonflement sous contraintes
a. coulage d'éprouvettes **b. protection vis-à-vis de la lixiviation**
c. cure d'éprouvettes **d. éprouvette équipée pour la cure**

3.2 Traitement thermique

3.2.1 Dispositif de cure thermique

L'énergie fournie aux corps d'épreuve lors de la cure thermique est évaluée en intégrant le profil de température du bain de cure au delà d'une température seuil de 60°C pour laquelle on considère un risque de RSI (cf. équation (2-8)). La Figure 2-66 représente l'évolution de température du bain de cure thermique lors des différentes fabrications. Ce procédé se révèle particulièrement répétable (comme confirmé par la faible dispersion des résultats donnés dans le Tableau 2-25). Les principales différences sont observées en fin de refroidissement, lorsque l'influence de la température extérieure se fait de plus en plus importante et rend plus compliqué le maintien d'une vitesse de refroidissement constante.

Le Tableau 2-25 fournit une estimation du potentiel d'expansion induit par la cure thermique sur la base du modèle proposé par (*Baghdadi et al. 2008-b*) présenté au Chapitre 1. Les paramètres de ce modèle ont été initialement calés sur les données présentées par (*Baghdadi et al. 2008-b*) mises à jour à l'aide de la poursuite du suivi dimensionnel des corps d'épreuve mis en œuvre dans leur étude. Cette étude a été menée sur un béton proche de R1 (composition identique mais rapport E/C égal à 0,49). Ceci a permis de déterminer un premier jeu de données du modèle. Par la suite, l'énergie d'activation de cette relation est ajustée pour chaque formule pour obtenir les potentiels de gonflement mesurés dans notre étude pour des cylindres de gonflement libre et présentés dans le Chapitre 3 (respectivement 0,34 %, 1,58 % et 1,55 % pour NR, R1 et R2) en intégrant les profils de traitement thermique correspondants (respectivement NR_GL+M, R1_GL+M et R2_GL+M). Il a donc été considéré que les paramètres α et T_0 sont identiques d'une formule à une autre. Les estimations de ces paramètres sont fournies dans le Tableau 2-24.

Avec des écarts maximaux de 0,01 % par rapport aux « potentiels visés », la réalisation de la cure thermique s'est révélée conforme à nos objectifs initiaux.

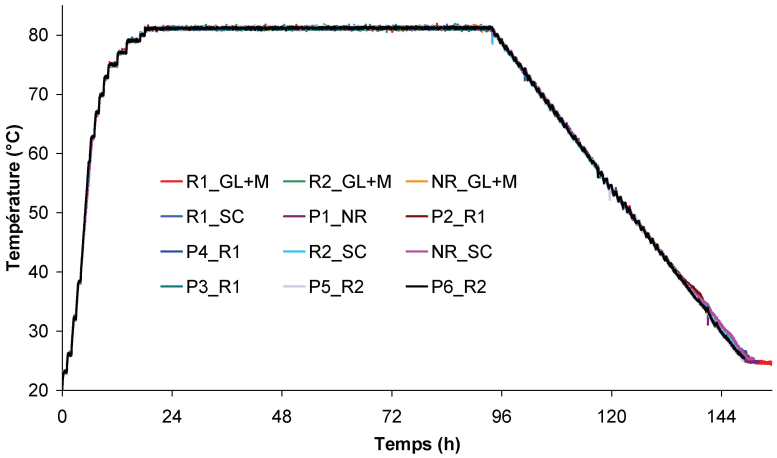


Figure 2-66 : réalisation expérimentale des traitements thermiques

Tableau 2-24 : paramètres du modèle de (*Baghdadi et al. 2008-b*) pour différents bétons

	R1	R2	NR
α (h^{-1})	6,48E-04	6,48E-04	6,48E-04
E ($J.mol^{-1}$)	435	440	895
T_0 (°C)	43,3	43,3	43,3

Tableau 2-25 : évaluation des énergies de traitement thermique

Corps d'épreuve	Potentiel RSI thermique (°C.h)	Potentiel de gonflement (*Baghdadi et al. 2008-b*)
NR_GL+M	1992	-
R1_GL+M	1989	-
R2_GL+M	1990	-
NR_SC	1993	0,34%
R1_SC	1989	1,58%
R2_SC	1994	1,56%
NR_P1	1998	0,34%
R1_P2	1995	1,58%
R1_P3	1991	1,58%
R1_P4	1998	1,59%
R2_P5	1998	1,56%
R2_P6	1995	1,56%
Moyenne (°C.h)	**1994**	-
Ecart type (°C.h)	***3***	-

3.2.2 Traitement thermique des poutres

Les réponses thermiques au point M4 (0,27 m de la face supérieure) de l'ensemble des poutres lors de leur traitement thermique sont représentées par la Figure 2-67, la Figure 2-68, la Figure 2-69 et la Figure 2-70. Ces relevés de température permettent d'identifier clairement les poutres en fonction de leur formule de béton constitutive (cf. Figure 2-68).

En revanche, la température ambiante lors du coulage des corps d'épreuve ne semble avoir une influence que lors des premières heures de traitement. De même, lors de la phase de palier, la poutre P1 se démarque de l'ensemble des corps d'épreuve par un dépassement de consigne plus marqué lors de la transition avec la phase de chauffe. Les poutres P5 et P6 fabriquées avec la formule R2 montrent quant à elles un comportement thermique similaire aux poutres P2, P3 et P4 coulées avec la formule R1 utilisant le même ciment_R. Enfin, les corps d'épreuve montrent des évolutions thermiques comparables lors du refroidissement, confirmant ainsi que les dégagements de chaleur par hydratation du ciment ne jouent plus à ce stade du traitement thermique qu'un rôle marginal par rapport à la température imposée par le bain de cure thermique.

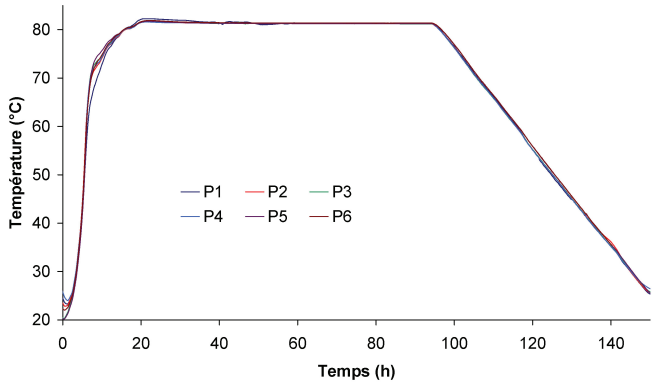


Figure 2-67 : réponse thermique des poutres au point M4 (0,27 m)

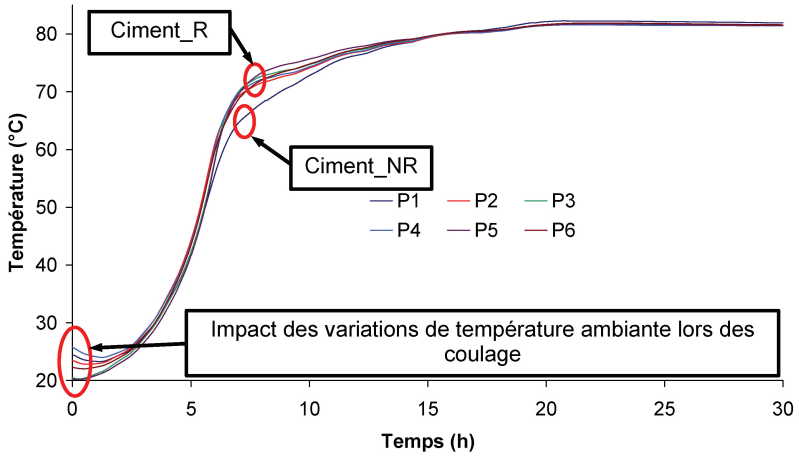


Figure 2-68 : réponse thermique des poutres au point M4 (0,27 m) – chauffe

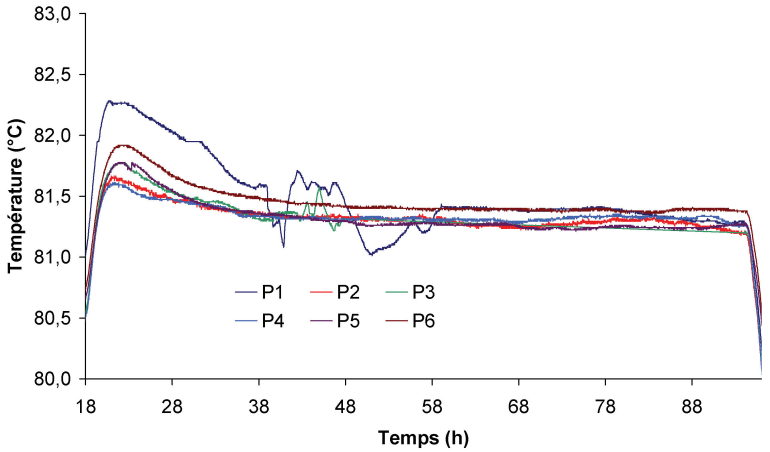


Figure 2-69 : réponse thermique des poutres au point M4 (0,27 m) – palier de température

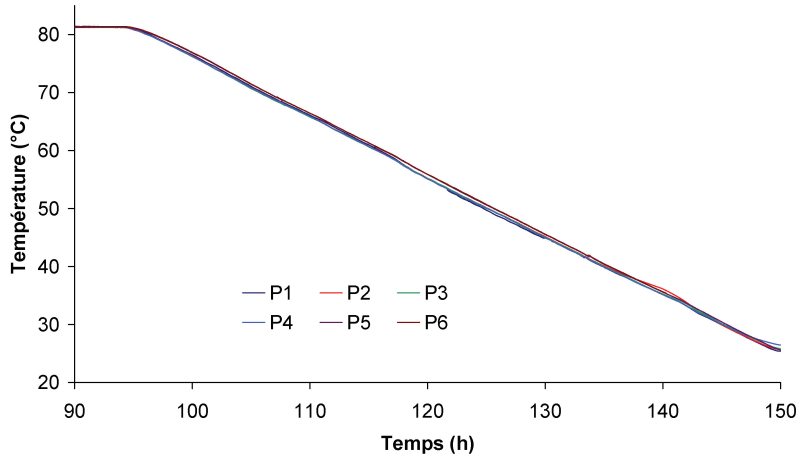


Figure 2-70 : réponse thermique des poutres au point M4 (0,27 m) – refroidissement

Le Tableau 2-26 et la Figure 2-71 représentent l'énergie de traitement thermique fournie à chaque corps d'épreuve lors de la cure. Ces données confirment la cohérence du traitement thermique avec les objectifs d'homogénéité et de répétabilité fixés par le cahier des charges. On note néanmoins que l'énergie de traitement thermique moyenne dans les poutres est légèrement supérieure d'environ 3 % à l'énergie délivrée par la cure thermique. Cet écart est induit par l'exothermie de l'hydratation des ciments et caractérise expérimentalement le biais de notre hypothèse considérant la phase de chauffe comme adiabatique.

Le Tableau 2-27 et la Figure 2-72 donnent une estimation des potentiels d'expansion tels qu'ils sont estimés par le modèle de (*Baghdadi et al. 2008-b*) établissant un couplage entre l'histoire thermique au jeune âge et l'amplitude finale des gonflements attendue. Les jeux de paramètres mis en œuvre sont ceux déterminés dans le Figure 2-24. Conformément à nos attentes, les profils de potentiel d'expansion se révèlent homogènes même si un effet d'inertie thermique est décelé en partie haute des structures. L'écart relatif reste néanmoins inférieur à 1 % par rapport à la valeur moyenne du potentiel dans une structure donnée.

On trouvera en Annexe 4 une représentation exhaustive des enregistrements de température de l'ensemble des corps d'épreuve au cours de leurs cures thermiques respectives.

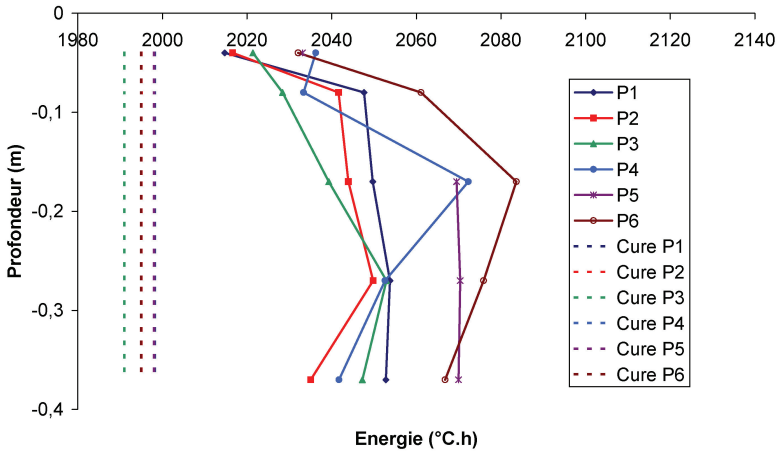
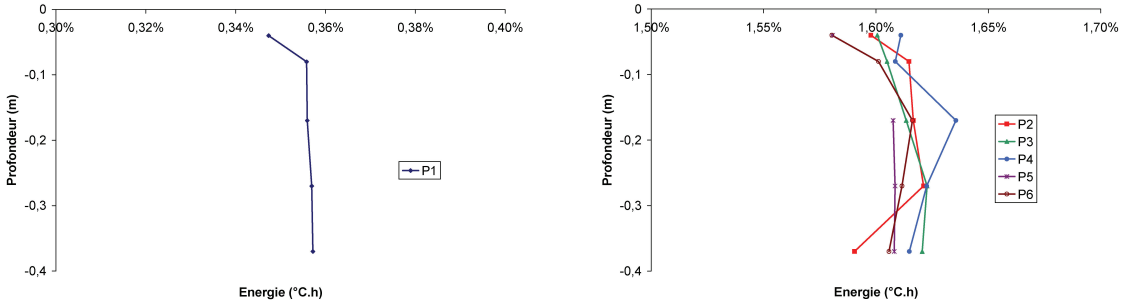


Figure 2-71 : profils d'énergie de traitement thermique des différentes poutres

Tableau 2-26 : énergies de traitement thermique au sein des différentes poutres

Point	Profondeur (m)	P1	P2	P3	P4	P5	P6	**Moyenne (°C.h)**	*Ecart type (°C.h)*
M1	-0,04	2015	2017	2021	2036	2033	2032	**2026**	*9*
M2	-0,08	2048	2042	2028	2033		2061	**2042**	*13*
M3	-0,17	2050	2044	2039	2072	2070	2084	**2060**	*18*
M4	-0,27	2054	2050	2053	2053	2070	2076	**2059**	*11*
M5	-0,37	2053	2035	2047	2042	2070	2067	**2052**	*14*
	Moyenne (°C.h)	**2044**	**2037**	**2038**	**2047**	**2061**	**2064**	**2048**	*11*
	Ecart type (°C.h)	*16*	*13*	*13*	*16*	*18*	*20*	*14*	



a. b.

Figure 2-72 : profils de potentiel de gonflement dans les poutres estimé par le modèle de (*Baghdadi et al. 2008-b*) (a. Poutre P1 ; b. Poutres P2 à P5)

Tableau 2-27 : potentiel de gonflement dans les poutres estimé par le modèle (*Baghdadi et al. 2008-b*)

Point	Profondeur (m)	P1	P2	P3	P4	P5	P6
M1	-0,04	0,35%	1,60%	1,60%	1,61%	1,58%	1,58%
M2	-0,08	0,36%	1,61%	1,60%	1,61%		1,60%
M3	-0,17	0,36%	1,62%	1,61%	1,64%	1,61%	1,62%
M4	-0,27	0,36%	1,62%	1,62%	1,62%	1,61%	1,61%
M5	-0,37	0,36%	1,59%	1,62%	1,61%	1,61%	1,61%
	Moyenne (°C.h)	**0,35%**	**1,61%**	**1,61%**	**1,62%**	**1,60%**	**1,60%**
	Ecart type (°C.h)	*0,00%*	*0,01%*	*0,01%*	*0,01%*	*0,01%*	*0,01%*

3.2.3 Lixiviation des alcalins

La Figure 2-73 synthétise les résultats des essais de caractérisation de la lixiviation en phase de cure thermique tels qu'ils sont définis dans la section 1.2.2.4.1. Les résultats de ces investigations semblent beaucoup plus disparates que ceux issus des essais de qualification des méthodes de protection vis-à-vis de la lixiviation présentés en section 2.2.4.6. Les matériaux ont donc été plus soumis que prévu à la lixiviation des alcalins.

Le corps d'épreuve R2_T_L_GL+M présente un comportement remarquable vis-à-vis de la lixiviation : la teneur en alcalins finale estimée dans le matériau est de l'ordre de 0,2 % de la masse de ciment, très loin de la teneur « théorique » du matériau. L'évaluation de la teneur en silice des échantillons correspondants conduit à l'estimation d'un dosage en ciment de l'ordre de 250 kg/m^3 (410 kg/m^3 en réalité). Une vérification du matériel a montré une défaillance ce qui laisse penser que ce résultat est certainement incorrect. Il apparaît en effet très peu probable que la lixiviation des alcalins ait été telle dans cet échantillon que la quasi-totalité des alcalins présents initialement dans le matériau aient disparu au cours de la cure thermique.

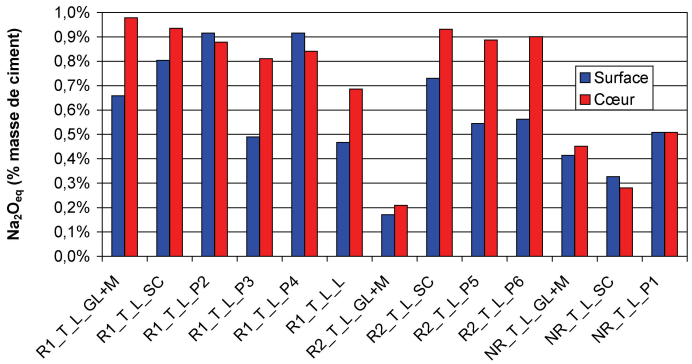


Figure 2-73 : synthèse des essais de caractérisation de la lixiviation des alcalins en phase de cure

3.3 Conclusions

La présente section a décrit de manière exhaustive la mise au point du programme expérimental de cette étude. Les principales innovations apportées, en particulier par rapport aux travaux de (*Multon 2004*), ont été décrites en détail, de même que les qualifications métrologiques correspondantes.

Le gâchage des matériaux s'est révélé très répétable, garantissant ainsi la production de matériaux similaires entre deux coulages successifs. Cet élément se révèle particulièrement important car il conditionne par la suite une grande partie des interprétations des suivis de corps d'épreuve.

Le procédé de cure thermique mis au point pour cette étude s'est révélé adapté aux attentes fixées par le cahier des charges. Il a permis d'appliquer à l'ensemble des corps d'épreuve un « potentiel de gonflement de RSI d'origine thermique » équivalent, quelle que soit leur géométrie et/ou leur composition. Pour cela, les vitesses d'échauffement des matériaux ont été calées sur les dégagements de chaleur du béton R1 en conditions adiabatiques : ceci a permis de limiter expérimentalement les échanges thermiques entre les corps d'épreuve et le bain de cure environnant en réalisant un « pseudo-asservissement » de la phase de chauffe sur les résultats d'un essai Q_{AB}. Le procédé a été validé numériquement et expérimentalement avant le lancement du programme d'essais. Le retour d'expérience des fabrications fait quant à lui état d'une très bonne répétabilité du procédé de cure thermique.

Enfin, du point de vue de la lixiviation des alcalins, les résultats des essais de caractérisation réalisés à l'issue des coulages ont révélé des performances moins bonnes que celles escomptées à l'issue des essais de qualification des méthodes de protection. Il semble que le lessivage ait touché la quasi-totalité des corps d'épreuve, sans pour autant atteindre le cœur du matériau. Ceci peut induire des gradients de potentiel de gonflement assez complexes à analyser : un départ précoce des alcalins en phase de cure peut conduire à une diminution de la quantité de sulfates adsorbés sur les CSH et donc potentiellement représenter une diminution de la réserve en réactifs pour la formation d'ettringite si on considère que les sulfates non fixés sont évacués dans le milieu environnant ; en revanche, si ce départ d'alcalins est plus tardif, il peut se traduire par une accélération de la désorption des sulfates contenus dans les CSH et donc accélérer les cinétiques de gonflement. En ce qui concerne les formules susceptibles de RAG, une diminution de la teneur en alcalins est en revanche systématiquement synonyme d'une diminution du potentiel de gonflement. En tout état de cause, il conviendra de garder à l'esprit ces résultats lors de l'interprétation des résultats du programme.

En ce qui concerne la qualification et le retour d'expérience des moyens métrologiques, l'utilisation d'un dispositif d'extensométrie à pointeaux s'est révélée bien adaptée à nos besoins : cette technique permet de suivre simplement et de manière robuste les gonflements des corps d'épreuve. En revanche, elle se révèle coûteuse en temps et nécessite de prendre des précautions vis-à-vis de la dépendance des résultats à l'opérateur.

L'utilisation des robots de mesure dimensionnelle semi-automatiques développés dans le cadre de l'étude de (*Multon 2004*) a mis en évidence la nécessité d'apporter un soin tout particulier à ce type de mesure. En particulier, l'espace restreint dont on dispose pour effectuer les suivis dimensionnels de corps d'épreuve sous chargement dans des bâtis de fluage s'est révélé délicat.

Les conditions d'exposition thermique et chimique agressives régnant durant la cure thermique se sont révélées critiques vis-à-vis de la mise en œuvre d'une instrumentation noyée dans les poutres. Ainsi, malgré toutes les précautions prises en phase de conception, les extensomètres à corde vibrante n'ont pu être coulés dans les corps d'épreuve. Une solution alternative de jauges d'extensométrie dites « pains de sucre » a été testée avec succès. De même, les mesures d'extensométrie sur armatures ont été effectuées à l'aide de jauges soudées, plus résistantes.

La phase de vieillissement des corps d'épreuve a nécessité une attention particulière pour collecter des données fiables. Les amplitudes d'expansion considérablement plus importantes dans le cas d'une RSI que dans celui d'une RAG ont notamment conduit à la destruction de certaines voies de mesure (mesures dimensionnelles, thermiques ou hydriques).

Par ailleurs, l'utilisation de plusieurs centrales d'acquisition a été nécessaire étant donné le nombre de voies de mesure mises en œuvre. Les problèmes de parasitage des signaux ont été résolus en isolant électriquement les différentes chaînes de mesure.