

présence de cristaux blancs précipitant au niveau des fissures (cf. Figure 4-62.b). Des prélèvements ont été effectués afin d'effectuer des analyses chimiques sur ces produits. Les résultats de ces analyses n'étaient pas disponibles au moment de la rédaction de ce mémoire. Peu avant la rupture (cf. Figure 4-62.d), la poutre est très fortement déformée et de larges fissures transversales sont ouvertes et remontent vers la face supérieure (Figure 4-62.c).

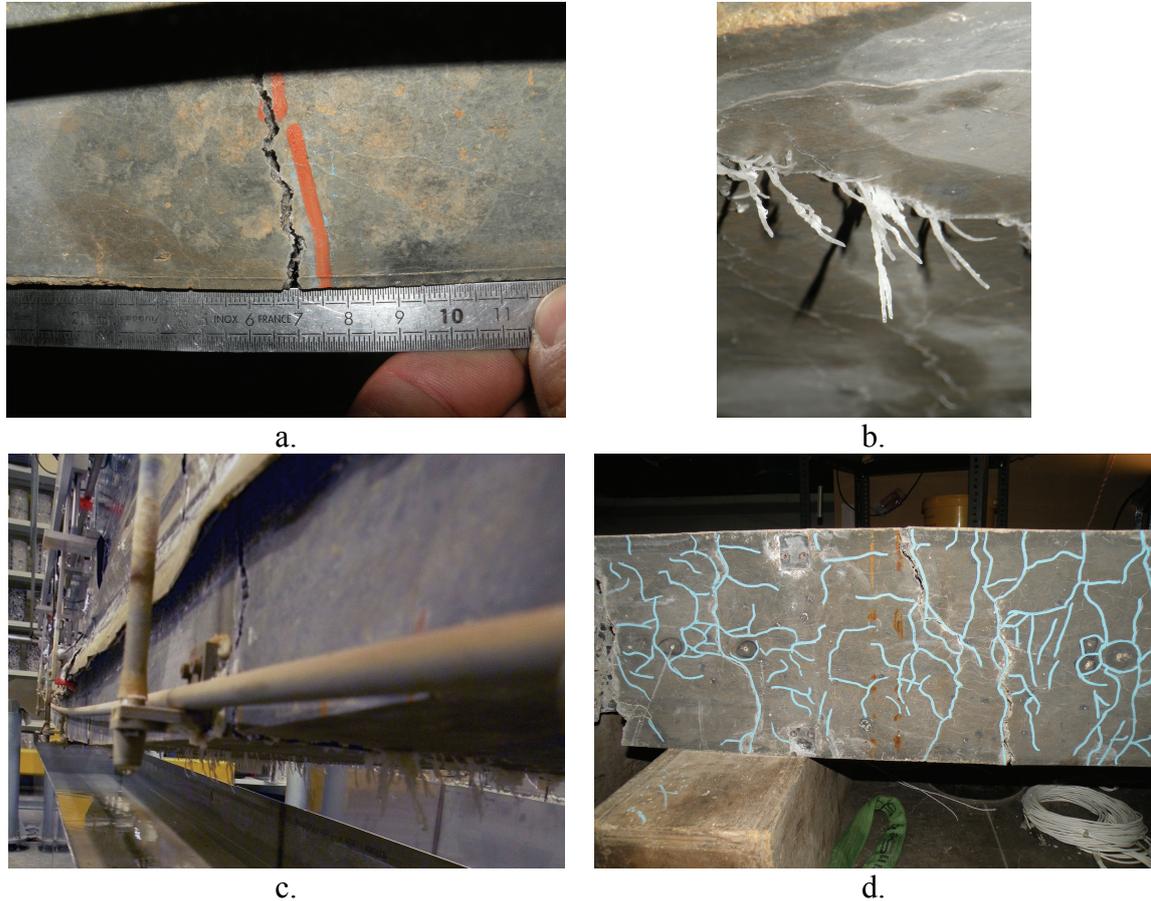


Figure 4-62 : fissuration de la poutre P5 (partie 2)
 a. fissuration transversale – vue de détail (145 jours)
 b. cristaux précipitant au niveau des fissures (145 jours)
 c. courbure de la poutre – fibre inférieure (160 jours)
 d. fissuration en face inférieure (post-rupture)

2.4 Investigations complémentaires suite à la rupture spontanée des poutres non armées réactives

2.4.1 Introduction

Les essais de gonflement libre sur les formules R1 et R2 ont montré que ces matériaux présentent un fort potentiel expansif. Devant le caractère extrêmement délétère des réactions de gonflement, les poutres P2 et P5, respectivement fabriquées avec les bétons R1 et R2, ont subi une ruine sous les effets combinés du poids propre et des expansions. La poutre P2 a rompu après environ 330 jours d'exposition. La ruine de la poutre P5 est survenue après 180 jours de suivi.

La Figure 4-63 illustre la rupture de ces structures : les sections 2.1 et 2.3 ont mis en évidence l'existence d'une fissuration prédominante et très localisée dans la direction transversale. Ces fissures ont été initiées au niveau de la face inférieure de la poutre et sont

remontées progressivement vers la face supérieure. La rupture a eu lieu dans les deux cas au droit des fissures les plus ouvertes (ouverture en partie inférieure de l'ordre de 10 à 20 mm).

Ce résultat n'était pas escompté lors de la mise au point de notre programme. Ainsi, la phase de remouillage initialement prévue pour ces corps d'épreuve n'a pu être mise en œuvre. Afin de parfaire notre compréhension des phénomènes ayant conduit à la ruine de ces poutres, une série d'investigations complémentaires ont été effectuées : des carottages ont été réalisés transversalement à la structure, afin d'estimer le potentiel d'expansion résiduelle en différents points d'une part (cf. Figure 4-64), et pour réaliser des observations microscopiques d'autre part.

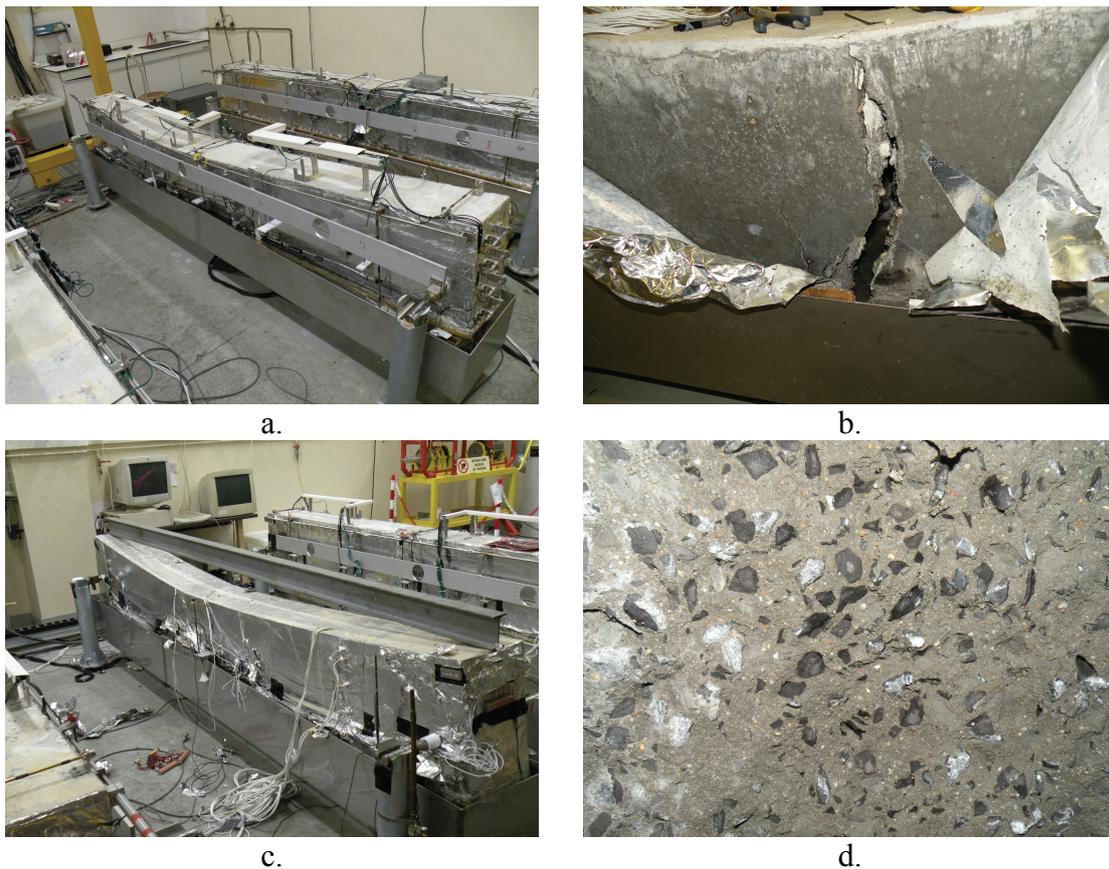


Figure 4-63 : poutres non armées après rupture
a. poutre P2 b. vue de détail de la zone de rupture de P2
c. poutre P5 d. vue de détail du faciès de rupture de P5



Figure 4-64 : extraction d'une carotte de 60 mm de la poutre P2

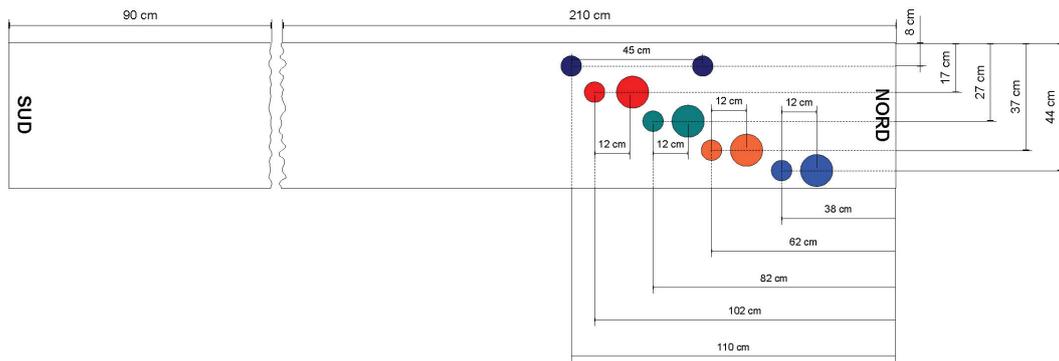


Figure 4-65 : plan de carottage de la poutre P2

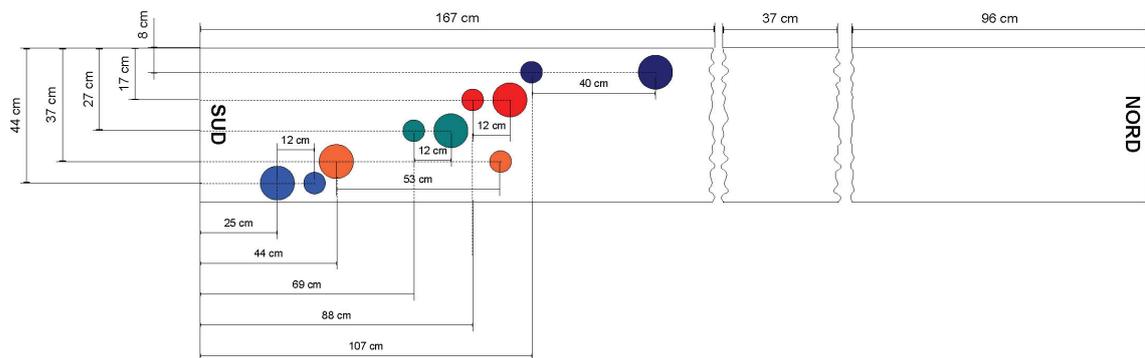


Figure 4-66 : plan de carottage de la poutre P5

La Figure 4-65 et la Figure 4-66 représentent les plans de carottage des poutres P2 et P5 respectivement. Les observations au MEB ont nécessité le prélèvement de carottes de diamètre 60 mm. Les essais d'expansion résiduelle ont été réalisés sur des carottes de 110 mm de diamètre à l'exception de la carotte située à 0,08 m de profondeur pour la poutre P2 qui n'a pu être réalisée qu'à un diamètre de 60 mm pour des raisons techniques (usure du carottier trop importante). Les carottages ont été effectués à des profondeurs de 0,08 m, 0,17 m, 0,27 m et 0,37 m afin de pouvoir confronter les expansions résiduelles mesurées aux mesures de déformation durant la phase de suivi ainsi qu'à 0,44 m afin d'évaluer le potentiel de réaction restant à développer dans la partie basse de la structure.

L'état de dégradation des matériaux a parfois posé problème pour la réalisation des carottes : dans la partie basse la plus dégradée par les expansions, le matériau présente un caractère friable ayant conduit dans certains cas à la destruction du matériau sous les effets du couple appliqué par le carottier. Dans ces cas, le matériau s'est désagrégé à l'intérieur du carottier, nécessitant de réaliser les prélèvements en d'autres lieux. Néanmoins, dans la majorité des cas, le carottage a tout de même pu être réalisé. En revanche, en partie haute, les bétons se sont révélés beaucoup plus résistants.

2.4.2 Essais d'expansion résiduelle

La nomenclature adoptée pour les corps d'épreuve est la suivante :

- Premier champ : type d'essai auquel est affectée l'éprouvette (ER = Expansion Résiduelle),
- Deuxième champ : poutre concernée par les essais,

- Troisième champ : profondeur de carottage, en mètre, par rapport à la face supérieure de la poutre.

ER	-	P2	-	0,08
		P5	-	0,17
				0,27
				0,37
				0,44

Figure 4-67 : nomenclature des cylindres pour essais d'expansion résiduelle des poutres P2 et P5

Les essais d'expansion résiduelle sont réalisés suivant une méthodologie proche de celle décrite par (Pavoine & Divet 2009). Après carottage des cylindres dans les structures, on instrumente trois génératrices disposées à 120° à l'aide de bases de mesure pour extensomètre à pointeaux suivant une technique identique à celle présentée au Chapitre 2. Les éprouvettes sont ensuite immergées durant 24 heures avant la réalisation du point zéro des mesures afin d'humidifier à nouveau le matériau et pour s'affranchir du gonflement hydrique de resaturation. La température de conservation est de 38°C.

La Figure 4-68 représente les suivis dimensionnels et massiques des carottes extraites des poutres P2 et P5 durant leur immersion. Dans les deux cas, on constate que l'application du gradient hydrique a conduit au développement d'un gradient de gonflement : le potentiel d'expansion résiduelle de l'éprouvette est d'autant plus élevé que la profondeur de prélèvement a été faible.

Dans le cas de P2, l'intégralité du potentiel de gonflement n'est pas consommée à 0,44 m de profondeur : on mesure un potentiel d'expansion résiduelle de l'ordre de 0,2 %. En partie haute, il semble que la réaction ait à peine débuté : le suivi du cylindre ER_P2_0,08 conduit à l'obtention d'une sigmoïde presque complète avec un potentiel d'expansion résiduelle de l'ordre de 1,9 % supérieure au potentiel de gonflement libre (cf. ci-après). Il semble que le temps de latence ait été consommé durant les 330 jours d'exposition de P2.

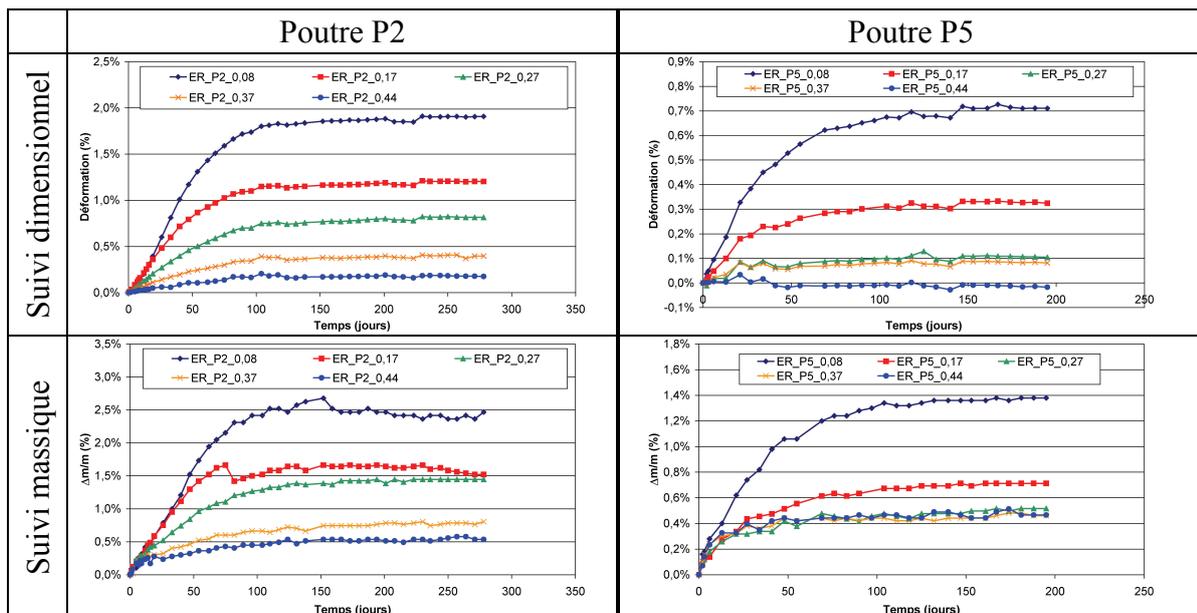


Figure 4-68 : suivis dimensionnels et massiques des cylindres d'expansion résiduelle – poutres P2 et P5

Dans le cas de la poutre P5, on observe que la réaction a atteint un stade beaucoup plus avancé au moment de la rupture du corps d'épreuve. Le suivi dimensionnel du cylindre ER_P5_0,44 ne fait état d'aucun gonflement, indiquant ainsi que la totalité de la réaction s'est développée à cette profondeur. L'expansion résiduelle mesurée à 0,27 m et 0,37 m de profondeur se révèle être tout à fait comparable. Ceci semble appuyer nos premières conclusions issues de l'analyse du suivi dimensionnel des structures : il semble que dans le cas de la poutre P5 la progression de la réaction sur la hauteur de la structure se soit faite de manière beaucoup plus rapide et brutale dans la partie inférieure de la poutre soumise à des gonflements intenses, puis on assiste à une décroissance spatiale rapide des expansions à mesure que l'on remonte dans la poutre (cf. section 2.3). Par ailleurs, par comparaison avec la poutre P2, il semble que le degré d'avancement de la réaction en partie supérieure soit beaucoup plus important : ainsi, à 0,17 m de profondeur, seul un potentiel résiduel de 0,3 % est mesuré. A 0,08 m de profondeur, il n'est plus que de 0,8 %, indiquant ainsi qu'une partie significative de la capacité d'expansion du matériau a été consommée après seulement 180 jours d'exposition.

Le Tableau 4-9 et le Tableau 4-10 synthétisent les paramètres de modélisation des gonflements libres déterminés pour l'ensemble des cylindres d'expansion résiduelle (y compris l'identification de la déformation et du temps permettant de se recaler sur la courbe maîtresse d'avancement de la réaction). La Figure 4-69 représente les courbes de gonflement reconstituées pour chaque cas et les confronte à la courbe de gonflement libre en immersion du matériau correspondant. On notera que le calage des paramètres pour les matériaux ayant développé le plus de gonflements se révèle être parfois délicat : lorsque les données de suivi dimensionnel ne permettent d'obtenir que la phase finale de la courbe sigmoïde, la détermination des paramètres est rendue plus incertaine.

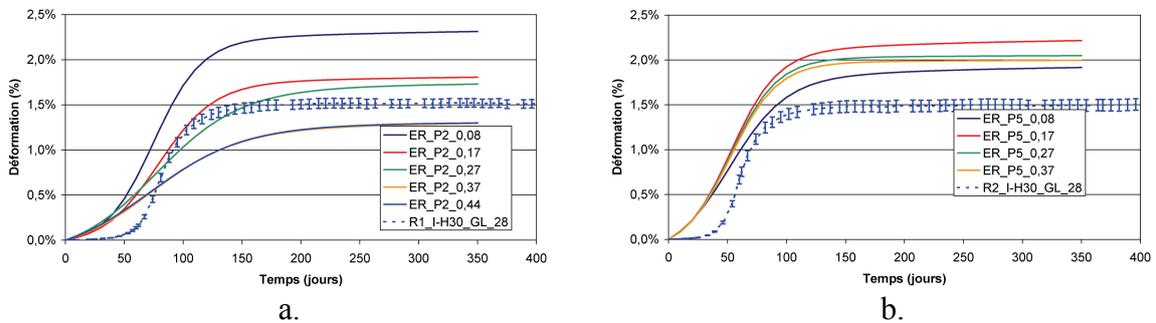


Figure 4-69 : courbes de gonflement reconstituées à partir des essais d'expansion résiduelle (a. poutre P2 ; b. poutre P5)

Tableau 4-9 : calage des paramètres de la loi sigmoïde pour les éprouvettes de gonflement libre – poutre P2

Profondeur (m)	0,08	0,17	0,27	0,37	0,44	R1_I-H30_GL_28
ε_{∞_RSI}	2,41%	1,87%	1,81%	1,38%	1,35%	1,58%
τ_{C_RSI}	20	24	36	37	39	11
τ_{L_RSI}	74	78	74	69	69	83
ϕ	18	17	22	28	18	18
δ	120	120	120	119	119	120
ε_{offset}	0,41%	0,61%	0,91%	0,90%	1,12%	-
t_{offset}	46	66	89	114	155	-
Exp. résiduelle = $\varepsilon_{\infty_GL} - \varepsilon_{offset}$	2,00%	1,27%	0,90%	0,48%	0,23%	-

Tableau 4-10 : calage des paramètres de la loi sigmoïde pour les éprouvettes de gonflement libre – poutre P5

Profondeur (m)	0,08	0,17	0,27	0,37	0,44	R2_I-H30_GL_28
ε_{∞_RSI}	2,01%	2,31%	2,07%	2,02%	-	1,55%
τ_{C_RSI}	24	20	20	20	-	9
τ_{L_RSI}	50	52	52	52	-	62
ϕ	23	20	5	5	-	15
δ	119	119	119	119	-	120
ε_{offset}	1,17%	1,86%	1,94%	1,91%	-	-
t_{offset}	70	93	115	121	-	-
Exp. résiduelle = $\varepsilon_{\infty_GL} - \varepsilon_{offset}$	0,84%	0,45%	0,13%	0,11%	-	-

D'une manière générale, on constate que les éprouvettes d'expansion résiduelle conduisent à l'estimation de gonflements dont l'amplitude est plus importante mais dont les temps caractéristiques sont plus longs. Les temps de latence sont quant à eux estimés avoir diminué. Ces conclusions ne sont pas applicables aux éprouvettes ER_P2_0,37 et ER_P2_0,44 pour lesquelles l'amplitude d'expansion estimée est inférieure à celle de R1_I-H30_GL_28. Néanmoins, cette différence peut trouver son origine dans le calage numérique des paramètres rendu délicat par l'obtention de la seule fin de la courbe de gonflement.

Différents éléments peuvent être avancés pour expliquer ces écarts entre gonflement libre et expansion résiduelle :

Tout d'abord, le sens de suivi dimensionnel par rapport au sens de coulage n'est pas identique pour les cylindres d'expansion résiduelle et les éprouvettes de gonflement libre (mesure dans la direction perpendiculaire au coulage dans le cas des essais d'expansion résiduelle et dans la même direction dans le cas des éprouvettes de gonflement libre). Même si la RSI est supposée induire des effets majoritairement isotropes dans le cas d'un gonflement libre (cf. Chapitre 1), nous ne disposons pas de données dans ces travaux permettant de l'assurer. Ainsi, un effet d'anisotropie intrinsèque pourrait expliquer en partie cet écart sur les amplitudes de gonflement. Ceci paraît d'autant plus vrai pour la poutre P5 constituée du béton R2 susceptible de RAG : en effet, (*Larive 1998*) et (*Multon 2004*) ont mis en évidence quantitativement une anisotropie intrinsèque significative des gonflements de RAG.

Néanmoins, il nous paraît plus probable que cet effet soit le résultat d'une différence de porosité entre les éprouvettes de gonflement libre et les cylindres d'expansion résiduelle. Dans les deux cas, les matériaux ont été vibrés à l'aiguille. Les éprouvettes de gonflement libre sont obtenues par carottage de blocs de 225 mm de hauteur coulés et vibrés en une seule couche. En revanche, dans le cas des poutres, le remplissage des coffrages s'est fait en trois fois en raison de la capacité du malaxeur utilisé. A chaque nouvelle gâchée, une vibration de l'interface entre les différents remplissages a été nécessaire pour assurer le remariage des couches et ainsi éviter la formation de strates. Ceci a induit une vibration plus importante de ces matériaux. Par ailleurs, le remplissage des coffrages de poutre par rapport à celui des blocs s'est révélé moins aisé du fait de la géométrie et de l'encombrement de l'instrumentation noyée et a également nécessité une vibration plus longue. Il en résulte donc probablement une différence de porosité entre les matériaux constitutifs des poutres et ceux des blocs d'expansion résiduelle, la porosité des poutres étant potentiellement plus faible. Cette diminution de la porosité peut impliquer une augmentation de l'amplitude des gonflements : la quantité d'ettringite nécessaire pour combler les vides déjà existants et masquant le potentiel d'expansion est moins importante.

Ainsi, la quantité d'ettringite exerçant une pression est donc plus importante et peut conduire à une augmentation des amplitudes. Par ailleurs, une réduction de la porosité peut également expliquer des temps de latence plus courts étant donné que la quantité de vide à combler avant de permettre le développement de pression par la formation de cristaux d'ettringite est moins importante. Enfin, la diminution de la porosité peut défavoriser les phénomènes de transfert au sein du matériau, rendant ainsi plus long le transport des réactifs nécessaires à la précipitation d'ettringite, expliquant ainsi l'augmentation des temps caractéristiques.

Finalement, la Figure 4-70 représente le gradient de potentiel d'expansion résiduelle des poutres P2 et P5. Ces résultats indiquent que la réaction s'est développée de manière très progressive dans la poutre P2 : le profil est quasi linéaire et le potentiel résiduel en partie haute reste très élevé. Cette conclusion ne semble pas applicable au cas de la poutre P5 : la réaction était pour cette poutre beaucoup plus avancée au moment de la rupture. Dans la partie supérieure de la poutre, le profil d'expansion résiduelle apparaît quasi-linéaire. En revanche, en dessous d'une profondeur de 0,27 m le potentiel d'expansion résiduelle est équivalent et très faible (exception faite de la mesure en partie basse qui fait état d'une réaction achevée).

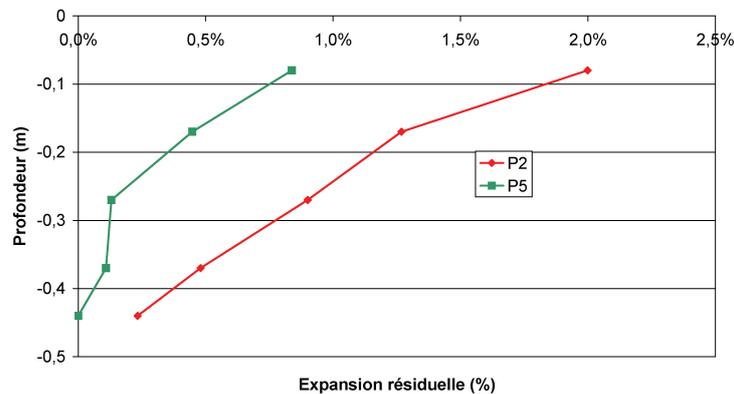


Figure 4-70 : gradient de potentiel d'expansion résiduelle des poutres P2 et P5

Le résultat de l'essai d'expansion résiduelle permet également d'évaluer le gonflement chimique ayant eu lieu dans la poutre juste avant la rupture. En effet, si on considère le potentiel de gonflement libre des matériaux comme une « donnée d'entrée », le gonflement développé dans la structure au moment de la rupture est a priori égal à $\varepsilon_{\infty_GL} - \varepsilon_{\infty_ER}$ où le premier terme correspond au potentiel de gonflement libre mesuré sur cylindre et le second au potentiel d'expansion résiduelle mesuré par les essais présentés dans cette section. Ainsi, on obtient, à 0,37 m de profondeur, $1,58 - 0,48 \sim 1,1$ % et $1,55 - 0,11 \sim 1,4$ % respectivement pour P2 et P5. Les mesures de déformation verticale (libres de toutes contraintes dans le cas des poutres) à 0,37 m de profondeur n'ont pu être menées jusqu'à l'instant de rupture des poutres. Néanmoins, une interpolation de ces courbes jusqu'à cette échéance conduit à l'évaluation de déformations de l'ordre de 1 % et 1,6 % respectivement pour P2 et P5, ordres de grandeurs similaires (cf. Figure 4-19 et Figure 4-50). Ceci met en évidence la pertinence de l'essai d'expansion résiduelle tel que nous l'avons mis en œuvre. Néanmoins, il convient de garder à l'esprit qu'il permet ici d'évaluer le degré d'avancement de la réaction car nous disposons d'une mesure de déformation dans une direction où le fonctionnement de la structure est entièrement libre. Une telle information se révèle difficilement accessible dans le cas d'une structure réelle nécessairement beaucoup plus complexe.

Par ailleurs, les très fortes expansions résiduelles mesurées en partie haute de la poutre ne permettent pas d'appliquer cette méthode et mettent en évidence la limite de notre approche : en effet, les expansions résiduelles se révèlent supérieures au potentiel de gonflement et conduisent donc à l'évaluation d'une déformation imposée négative dans ces conditions.

2.4.3 Observations microscopiques

Le gradient d'avancement de la réaction atteint en fonction de la cote au sein des structures peut être constaté visuellement sur les carottes extraites des poutres : les carottes situées en partie basse sont visiblement plus dégradées que celles prélevées au niveau de la surface (cf. Figure 4-71 et Figure 4-72). En particulier, l'interface pâte – granulat apparaît moins cohésive. Les matériaux situés en partie basse sont plus friables et ont été abîmés lors du carottage.



Figure 4-71 : carottes de 60 mm extraites des poutres P2 (a.) et P5 (b.) pour observations microscopiques (profondeur croissante de gauche à droite)

Profondeur (m)	P2	P5
0,08		
0,17		
0,27		
0,37		
0,44		

Figure 4-72 : vue de détail des carottes de 60 mm

Les observations microscopiques confirment qualitativement les informations quantitatives issues des suivis dimensionnels et des essais d'expansion résiduelle. Dans le cas de la poutre P2, les échantillons les plus dégradés sont situés plus en profondeur dans la poutre (cf. Figure 4-73.a). Néanmoins, de l'ettringite est observée relativement haut dans la structure (cf. Figure 4-73.b). Par ailleurs, une ouverture des interfaces pâte granulat avec remplissage par de l'ettringite est notée à 0,08 m, signe caractéristique de la RSI (cf. Figure

4-73.c). En outre, à l'image des essais menés sur les éprouvettes de gonflement libre (cf. Chapitre 3), quelques traces de gel de RAG ont été détectées dans les échantillons pourtant constitués de granulats réputés non réactifs (cf. Figure 4-73.d). Néanmoins, l'absence de gonflement de la formule BT dans nos conditions expérimentales confirme l'absence de réactivité « globale » de ce granulat vis-à-vis de la RAG.

Pour la poutre P5, les observations à toutes les profondeurs révèlent des quantités importantes d'ettringite et de gel d'alcali-réaction. Ainsi, on observe du gel de RAG à 0,08 m de profondeur (cf. Figure 4-74.a). Par ailleurs, l'ettringite est omniprésente dans tous les échantillons (cf. Figure 4-74.b).

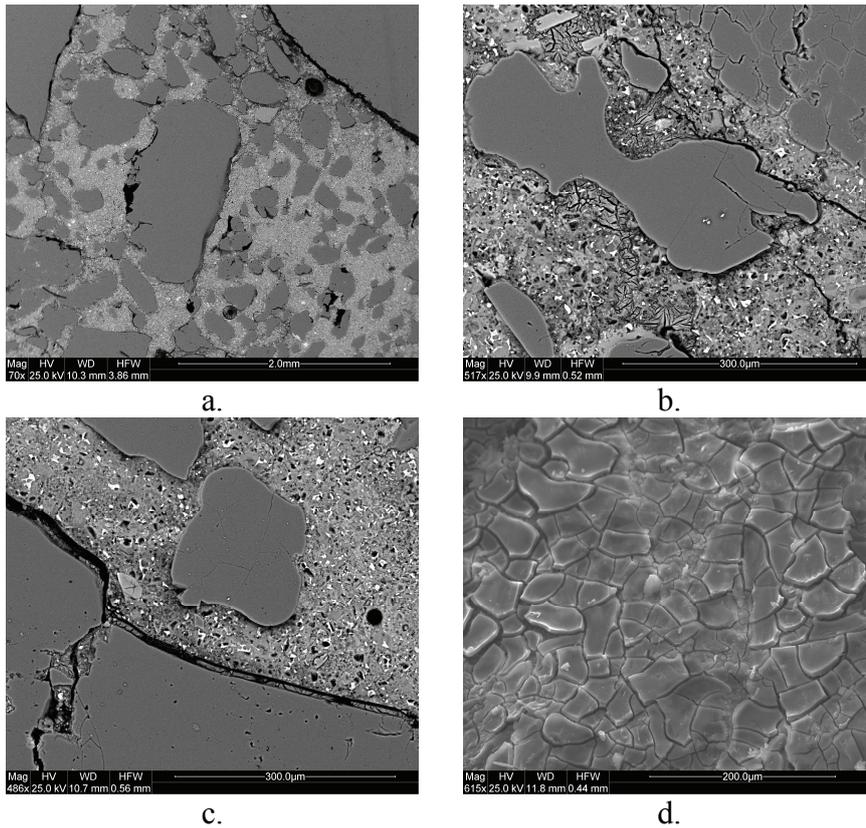


Figure 4-73 : observations microscopiques des prélèvements effectués sur P2
 a. profondeur 0,44 m – structure décohésive
 b. profondeur 0,17 m - ettringite
 c. profondeur 0,08 m – ouverture interface pâte-granulat
 d. profondeur 0,27 m – gel d'alcali-réaction

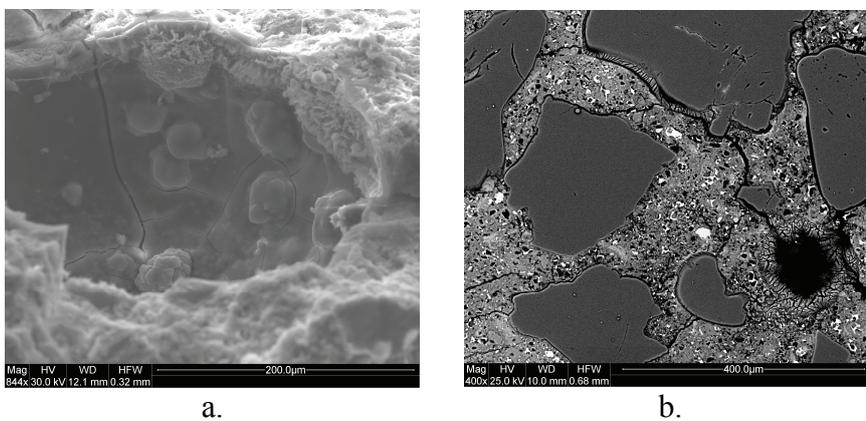


Figure 4-74 : observations microscopiques des prélèvements effectués sur P5
 a. profondeur 0,08 – gel d'alcali-réaction
 b. profondeur 0,17 m – remplissage des vides par l'ettringite

2.5 Synthèse du comportement mécanique expérimental des poutres non armées

Les sections 2.1 à 2.4 ont décrit et quantifié en détail le fonctionnement mécanique expérimental de poutres non armées soumises à des réactions de gonflement (RSI plus ou moins intense couplée ou non à la RAG). Les différentes mesures réalisées dans les trois directions de l'espace (mesures locales et globales) sont confrontées. Finalement, un profil de déformation longitudinale moyen est proposé pour décrire le fonctionnement mécanique des corps d'épreuve dans le sens privilégié de fonctionnement de ces poutres.

D'une manière générale, l'application d'un gradient hydrique a conduit au développement d'un gradient de gonflement, quel que soit le potentiel expansif du matériau constitutif de la poutre. Cette sollicitation entraîne une mise en flexion des poutres, d'autant plus importante et rapide que le potentiel et la cinétique d'expansion du matériau en gonflement libre sont importants. La Figure 4-75 illustre les différences d'amplitude et de cinétique de déformation des poutres : on retrouve ici les différences observées dans le cadre des essais de gonflement libre.

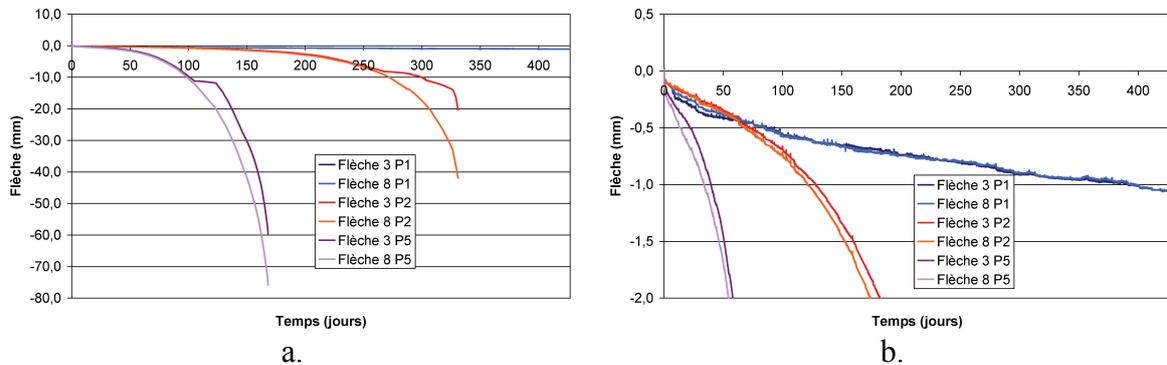


Figure 4-75 : comparaison des flèches à mi-portée des poutres non armées (a. vue générale ; zoom)

Par ailleurs, les hypothèses de validité de la théorie des poutres ont été vérifiées pour ces trois corps d'épreuve. L'intégration de la courbure des sections permet de retrouver la flèche de la structure de façon tout à fait satisfaisante. Ceci se révèle être un point très important quant à la modélisation de structures atteintes de RSI. Le fonctionnement longitudinal des structures peut ainsi être caractérisé à l'aide d'une courbure et d'une déformation longitudinale moyenne.

En outre, l'ensemble des données a été confronté aux modélisations hydriques mis en œuvre dans ces travaux afin d'évaluer le profil hydrique dans les corps d'épreuve. D'une manière générale, il en ressort que, malgré la sous-estimation de la hauteur de remontée hydrique induite par l'hypothèse de passage instantané de l'état initial à l'état dégradé pour les matériaux imbibés, la position du front d'imbibition par le modèle de comportement hydrique binaire semble qualitativement en accord avec les suivis dimensionnels de la structure. En revanche, le modèle de comportement hydrique de gonflement libre pondéré par la cinétique d'imbibition globale de la poutre semble conduire à une surestimation trop importante du front de remontée hydrique, impliquant fréquemment une interpénétration des zones imbibées et séchées.

Le cas des poutres P2 (R1) et P5 (R2) a abouti à une rupture sous poids propre des structures respectivement après 330 jours et 180 jours d'exposition, les phénomènes de

gonflement s'étant révélés particulièrement délétères. Des essais d'expansion résiduelle ont été menés à différentes profondeurs afin d'évaluer le degré d'avancement des dégradations imputées à ces deux structures. Ceux-ci ont confirmé les éléments issus du suivi dimensionnel des structures. Si pour P2 la réaction semble n'avoir que faiblement atteint la partie supérieure du corps d'épreuve, une part substantielle du potentiel de gonflement à 0,08 m de profondeur s'était développée dans le cas de P5 au moment de sa rupture. De même, la progression des phénomènes expansifs sur la hauteur de la poutre semble beaucoup plus rapide dans le cas de P5. En revanche, l'établissement d'un profil d'expansion résiduelle quasi-linéaire suivant la hauteur de la structure pour P2 semble indiquer une progression beaucoup plus progressive de la réaction.

On trouvera en Annexe 7 une synthèse exhaustive des suivis dimensionnels et hydriques des poutres non armées.

2.6 Analyse mécanique des poutres non armées

2.6.1 Introduction

L'objectif de l'approche développée dans cette section consiste à vérifier que, sur la base d'essais de gonflement libre en laboratoire, et moyennant la connaissance d'un état hydrique plausible, il est possible d'expliquer le fonctionnement mécanique des poutres testées (dans le cadre de la théorie de la RdM) en prenant si nécessaire en compte les couplages s'appliquant aux déformations chimiques imposées localement.

Pour mener à bien le re-calcul des structures considérées dans ces essais, il convient tout d'abord de disposer des données d'entrées nécessaires. Le principe de la modélisation proposée, à l'image de l'approche proposée par (*Multon 2004*), est d'identifier un profil de déformations imposées à partir du profil hydrique de la structure. Ceci revient à prendre en compte les couplages existant entre humidité et gonflement. La détermination du profil de déformations imposées se fait en utilisant les mesures dimensionnelles effectuées dans le cadre des essais de gonflement libre et utilisées comme une donnée d'entrée du calcul.

Par la suite, on évalue la réponse mécanique de la structure dans le cadre de la théorie de la résistance des matériaux. L'analyse des résultats expérimentaux a en effet montré que cette théorie peut s'appliquer dans le cadre de nos essais.

Les résultats expérimentaux sont confrontés graphiquement aux estimations issues des calculs que nous développons. Les incertitudes évaluées pour ces calculs sont représentées sous la forme de barres d'erreur. On trouvera en Annexe 8 le détail des calculs correspondants.

2.6.2 Principe de la modélisation et notations adoptées

Par convention, l'axe vertical suivant la hauteur de la poutre (z) est orienté vers le haut et son origine est fixée au niveau de la face supérieure. Par conséquent, les cotes considérées pour décrire la section des poutres sont négatives.

La première étape du calcul consiste en la détermination du profil hydrique des structures. Le détail de ces calculs a été fourni en section 1.4.1. D'une manière générale, les variations massiques de la poutre sont écrites de la façon suivante :