
Chapitre 3 Caractérisation des couplages entre humidité et expansions sur des réactions de gonflement interne

1	Introduction	173
2	Modélisation mathématique des gonflements libres	173
3	Cas de la réaction sulfatique interne.....	175
3.1	Eprouvettes soumises à un apport d'eau	175
3.2	Eprouvettes soumises à un séchage à 30 % HR	177
3.3	Eprouvettes non soumises à des échanges hydriques.....	180
3.4	Conclusions.....	183
4	Cas du couplage entre RSI et RAG.....	183
4.1	Eprouvettes immergées	184
4.2	Eprouvettes conservées sous 100 % HR	186
4.2.1	Suivi massique et dimensionnel	186
4.2.2	Mécanisme de gonflement suggéré.....	188
4.2.3	Modélisation proposée	190
4.2.4	Investigations complémentaires utiles à l'évaluation de la pertinence du modèle de superposition RAG-RSI.....	192
4.2.4.1	Evaluation du potentiel de RAG de la formule R2.....	192
4.2.4.1.1	Suivis dimensionnel et hydrique.....	192
4.2.4.1.2	Comportements hydriques.....	196
4.2.4.2	Caractérisation de la lixiviation en phase de stockage	196
4.2.4.3	Caractérisation microscopique des matériaux	198
4.3	Eprouvettes non soumises à un apport d'eau	205
4.4	Influence de la température de conservation	206
4.4.1	Suivis des corps d'épreuve et lixiviation des alcalins	206
4.4.2	Comportement hydrique	209
4.5	Conclusions.....	210
5	Influence de la composition du ciment : cas d'un ciment CEM I PM ES.....	212
5.1	Eprouvettes soumises à un apport d'eau	212
5.2	Eprouvettes non soumises à un échange hydrique	214
5.3	Eprouvettes soumises à un séchage à 30 % HR	215
5.4	Conclusions.....	216
6	Suivi d'un béton non réactif.....	217
6.1	Corps d'épreuve immergés	217
6.2	Corps d'épreuve soumis à un séchage.....	218
6.3	Conclusions.....	219
7	Comportement hydrique des matériaux : interprétations	220
7.1	Retrait de dessiccation.....	220
7.2	Cas d'une expansion : origine de la prise de masse ?.....	223
8	Essais d'expansion résiduelle et expansion complète reconstituée.....	232
8.1	Quantification des expansions et estimation des paramètres.....	232
8.2	Cohérence des essais d'expansion résiduelle et des essais de gonflement libre.....	233
8.3	Interprétations	235

9	Influence du mode de préparation des corps d'épreuve	236
9.1	Carottage et moulage	236
9.2	Répétabilité de fabrication	239
10	Effets d'une humidification ou d'un séchage tardifs.....	241
10.1	Cas de la réaction sulfatique interne	241
10.1.1	Effets d'un séchage tardif	241
10.1.1.1	Eprouvettes de gonflement libre	241
10.1.1.2	Influence de l'histoire du matériau : effets de l'échéance de carottage	245
10.1.1.3	Conclusions.....	246
10.1.2	Effets d'une humidification tardive	246
10.1.2.1	Eprouvettes de gonflement libre	246
10.1.2.2	Couplage entre gonflements et degré de saturation	250
10.1.2.3	Influence de l'histoire du matériau : effets de l'échéance de carottage	252
10.2	Influence de la réactivité du matériau	254
10.2.1	Effets d'un séchage tardif.....	254
10.2.2	Effets d'une humidification tardive	258
10.2.2.1	Eprouvettes de gonflement libre	258
10.2.2.2	Couplage entre gonflements et degré de saturation	262
10.2.2.3	Influence de l'échéance de carottage des corps d'épreuve	264
11	Evaluation des couplages entre contraintes et gonflements.....	266
11.1	Introduction	266
11.2	Eprouvettes susceptibles de RSI – formule R1	267
11.3	Comportement des corps d'épreuve en fonction de leur réactivité	268
11.4	Suspensions d'expansion	269
11.5	Conclusions	270
12	Conclusions	270

1 Introduction

L'étude bibliographique du Chapitre 1 a montré que l'humidité joue un rôle déterminant vis-à-vis du développement de la RSI. Ainsi, les investigations menées *in situ* font souvent état de dégradations plus marquées (et/ou plus précoces) dans les zones plus exposées à l'humidité (e.g. *Shayan & Quick 1992, Lawrence et al. 1999*) ou soumises à des cycles d'humidification / séchage (e.g. *Fu et al. 1997, Petrov 2003, Pavoine et al. 2006-a*). le programme expérimental de cette thèse s'est donc largement consacré à l'étude de(s) couplage(s) existant entre les gonflements (aussi bien en termes d'occurrence, d'amplitude et de cinétique) et l'humidité environnante du matériau, afin d'apporter des éléments quantitatifs permettant de caractériser ces couplages et de comprendre les mécanismes physico-chimiques sous-jacents pour formuler/valider les lois de couplages nécessaires aux outils de re-calcul.

Dans ce cadre, cette section décrit et interprète les résultats des essais visant l'étude de ces couplages menés au cours de ces travaux. Il s'agit principalement d'essais de gonflement libre réalisés sur des éprouvettes de petite taille ($\varnothing = 110$ mm ; H = 220 mm) dont on a donné une description détaillée dans le Chapitre 2. L'utilisation de ce type de corps d'épreuve a pour objectif de caractériser les effets de l'humidité à l'échelle du matériau (même si, dans certaines conditions telles qu'un séchage sévère dans une atmosphère à 30 % HR, le développement de gradients hydriques dans de telles éprouvettes conduit à un comportement de « mini-structures »). Dans un premier temps, des essais de gonflement libre sont réalisés sur des formules de réactivités diverses vis-à-vis de la RSI (mais également de la RAG) dans différentes conditions d'exposition à l'humidité. Dans ce contexte, des quantifications des gonflements (cinétiques et amplitudes) sont proposées afin de caractériser les effets de la présence d'eau sur les phénomènes pathogènes. Dans un second temps, une évaluation des effets d'une humidification ou d'un séchage tardifs est effectuée. Ce changement de conditions hydriques est destiné à vérifier le caractère irréversible ou non des déformations chimiques dans leur superposition aux gonflements/retraits hydriques du matériau supposé sain.

L'objectif à terme pour la mise en œuvre de méthodes de re-calcul est de disposer d'informations précises concernant les déformations chimiques irréversibles d'une part (dont on considère les caractéristiques d'amplitude et de cinétique couplées à l'humidité à l'image des phénomènes de RAG comme l'ont suggéré (*Poyet 2003*) et (*Li et al. 2004*) par exemple) et les déformations hydriques plus ou moins réversibles (*Granger et al. 1997-a, Torrenti et al. 1999-b, Baghdadi 2008*) d'autre part.

Pour chaque représentation graphique, les données tracées correspondent à la moyenne des estimations obtenues pour les différents corps d'épreuve des essais concernés. Les barres d'erreur représentent la dispersion des résultats et leur longueur correspond à plus ou moins un écart-type de part et d'autre de la moyenne.

2 Modélisation mathématique des gonflements libres

Afin de quantifier les amplitudes et les cinétiques de gonflements, on utilise une loi sigmoïde proposée par (*Brunetaud 2005*) après adaptation de la modélisation de la RAG développée par (*Larive 1998*) et permettant de décrire mathématiquement l'évolution des gonflements libres des matériaux. Cette loi a été utilisée par (*Baghdadi 2008*) pour

modéliser l'avancement des expansions de réaction sulfatique interne et est donnée par la relation (3-1) :

$$\begin{cases} \varepsilon(t) = \varepsilon_{\infty} \cdot \frac{1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_C}\right)}{1 + \exp\left(-\frac{t - \tau_L}{\tau_C}\right)} \cdot \left(1 - \frac{\phi}{\delta + t}\right) \\ 0 \leq \phi \leq \delta \text{ pour que } 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{\infty} \quad \forall t > 0 \end{cases} \quad (3-1)$$

ε_{∞} représente la déformation atteinte en fin de réaction. τ_l représente le temps de latence, c'est à dire l'instant où la réaction s'accélère par augmentation de la diffusion au sein du matériau du fait de la microfissuration (*Larive 1998*). Le temps caractéristique τ_c est lié quant à lui à la « nervosité » de la réaction à savoir la vitesse à laquelle la phase de stabilisation des déformations est atteinte (τ_c est inversement proportionnel à la pente de la courbe de gonflement au point d'inflexion). ϕ et δ sont deux paramètres introduits par (*Brunetaud 2005*) permettant de modéliser une phase asymptotiquement linéaire en fin de réaction qui représente de manière plus pertinente la RSI (cf. Figure 3-1 et Figure 3-2). Le calage numérique de la loi se fait en ajustant les paramètres aux données expérimentales par une méthode des moindres carrés. L'objectif est ainsi de corréliser les paramètres de gonflement libre à la saturation des corps d'épreuve supposée homogène dans les conditions expérimentales proposées dans cette étude (immersion, atmosphère saturée et scellement hydrique), exception faite des éprouvettes soumises à un séchage à 30 % HR pour lesquelles un gradient hydrique sévère se développe (cf. section 3.2).

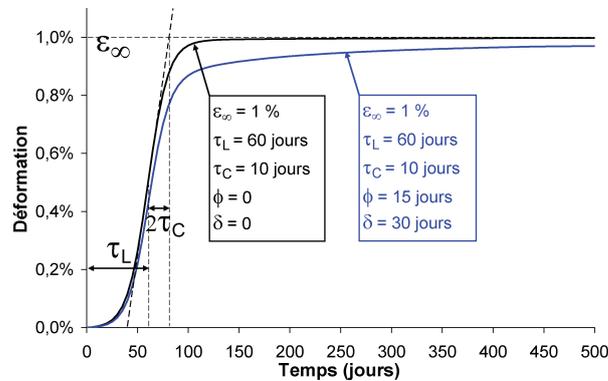


Figure 3-1 : description du modèle de gonflement libre RSI

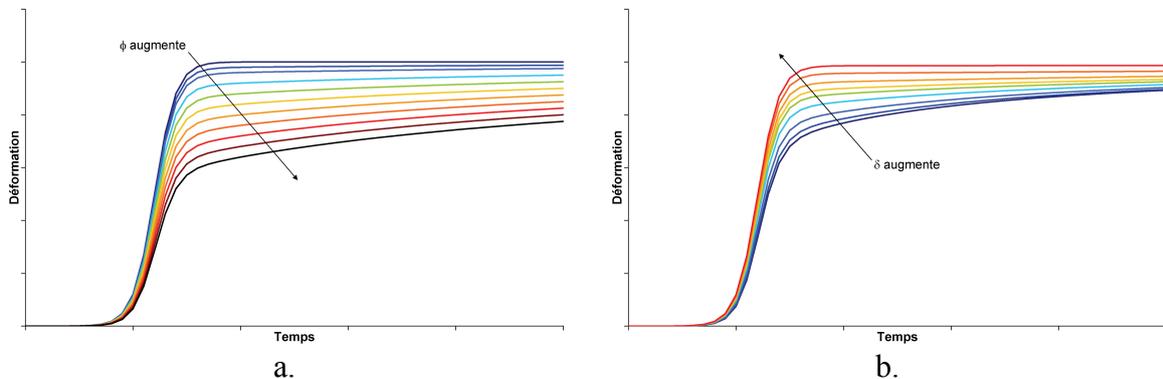


Figure 3-2 : influence des paramètres ϕ (a.) et δ (b.) sur la modélisation des gonflements libres

3 Cas de la réaction sulfatique interne

3.1 Eprouvettes soumises à un apport d'eau

La Figure 3-4 représente les suivis dimensionnels et massiques des échantillons de gonflement libre R1 conservés en eau et à 100 % HR. Le Tableau 3-1 donne les jeux de paramètres du modèle de (Brunetaud 2005) déterminés pour ces données expérimentales. Il apparaît que les cinétiques de gonflement sont plus rapides (temps de latence et temps caractéristiques plus courts) et les amplitudes plus importantes pour les échantillons conservés en eau que pour les échantillons conservés à 100 % HR. Ceci est cohérent avec d'autres études expérimentales, notamment les travaux sur mortiers soumis à une cure thermique étudiés par (Famy et al. 2001). Ces différences de cinétiques et d'amplitude peuvent trouver leur origine dans la présence d'une plus grande quantité d'eau sous forme liquide pour les échantillons immergés, source de réactifs d'une part (une molécule d'ettringite contient 32 molécules d'eau) comme le mentionnent par exemple (Taylor et al. 2001), mais aussi responsable d'une lixiviation des alcalins induisant une chute de pH et favorisant la précipitation d'ettringite (e.g. Brown & Bothe 1993, Divet & Randriambololona 1998). Par ailleurs, l'eau en tant que milieu réactionnel est également favorable à la mobilité des réactifs. Durant leur gonflement, les corps d'épreuve considérés développent une fissuration modérée qui semble être répartie de manière homogène sur l'ensemble des corps d'épreuve (cf. Figure 3-3).

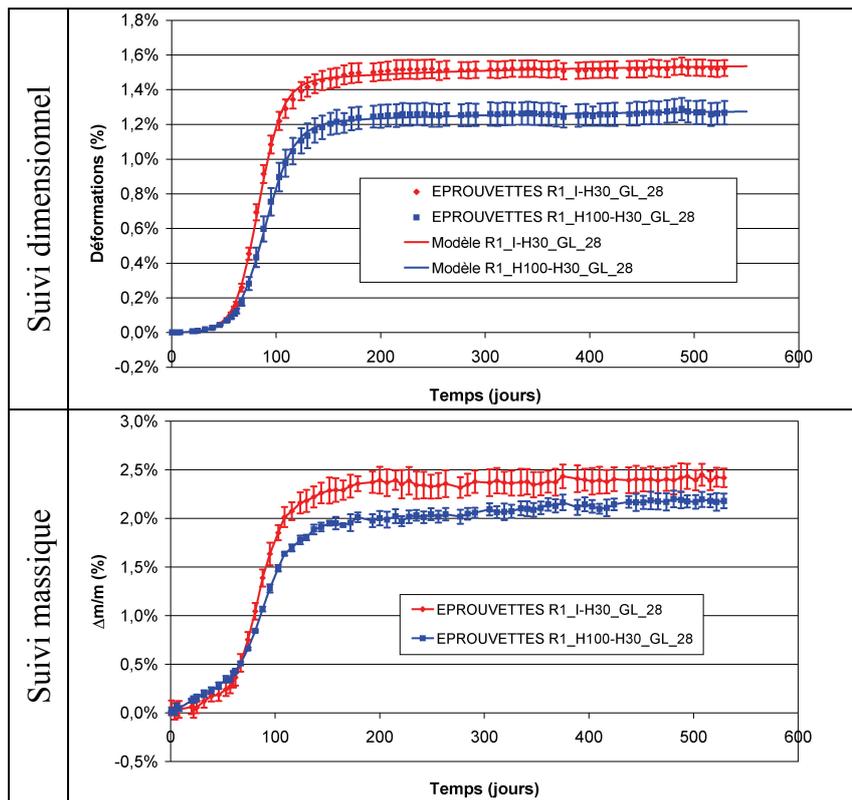
Par ailleurs, on note que les cinétiques et les amplitudes apparaissent nettement différentes de celles obtenues « classiquement » pour la RAG comme par exemple dans l'étude de (Multon 2004) ou celle de (Larive 1998) : dans le cas de ces deux recherches, les amplitudes d'expansion apparaissent nettement moins importantes (de l'ordre de 0,3 % au maximum) ; en termes de cinétique, la principale différence porte sur le temps caractéristique largement plus faible dans le cas de RSI présenté dans ce mémoire en comparaison aux résultats des deux recherches sur la RAG mentionnées précédemment. Avec des amplitudes d'expansion supérieures à 1 % dans le cas d'une humidité environnante élevée, les expansions développées par la formule R1 se révèlent caractéristiques d'une RSI « intense » à l'image des travaux de (Pavoine 2003) ou (Brunetaud 2005) par exemple.



Figure 3-3 : fissuration d'une échantillon de gonflement libre R1 après 450 jours de conservation en eau

Tableau 3-1 : calage des paramètres du modèle de gonflement libre – éprouvettes R1 – conservation en eau et à 100 % HR

	R1_I-H30_GL_28	R1_H100-H30_GL_28
ε_{∞}	1,58%	1,31%
τ_C (jours)	11	13
τ_L (jours)	83	89
ϕ (jours)	18	18
δ (jours)	120	120

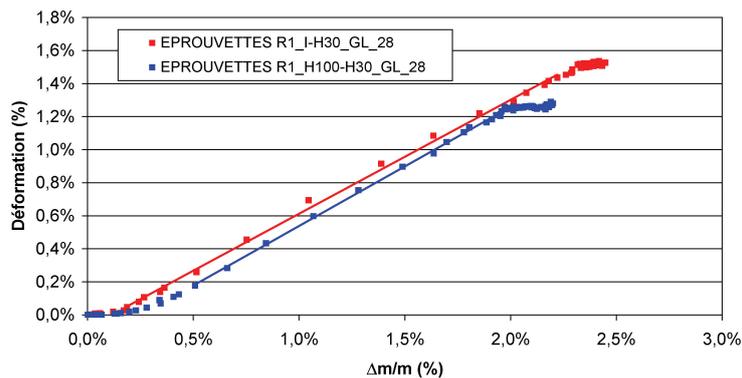
**Figure 3-4 : suivis dimensionnels et massiques – éprouvettes R1 – conservation en eau et à 100 % HR**

Le Tableau 3-2 compare les calages de paramètres de gonflement libre, pour chaque éprouvette considérée indépendamment, au calage obtenu à l'aide de la moyenne des déformations du même lot de corps d'épreuve présenté en Tableau 3-1. On note que les valeurs déterminées sont très proches pour les deux méthodes considérées, justifiant ainsi par la suite notre détermination des paramètres de gonflement libre sur la moyenne des suivis dimensionnels. Par ailleurs, la dispersion des résultats est limitée, la plus grosse incertitude portant sur la détermination du paramètre ϕ et traduisant la difficulté plus importante pour caler la fraction linéaire du modèle de (Brunetaud 2005). A la lumière de ces résultats, il semble donc que les différences de temps de latence observées entre les éprouvettes conservées immergées et en atmosphère saturée puissent être considérées comme significatives (cf. Tableau 3-1). En revanche, les différences de temps caractéristique apparaissent moins évidentes. Cette dispersion des données peut être considérée comme un ordre de grandeur de la représentativité des variations des paramètres de modélisation des gonflements.

Tableau 3-2 : influence de la méthode de calage des paramètres de gonflement libre – éprouvettes R1 – conservation en eau

Epreuves R1_I-H30_GL_28							
N° éprouvette	1	2	3	4	Moyenne	Ecart-type	Calage moyen
ε_{∞}	1,56%	1,63%	1,58%	1,54%	1,58%	0,04%	1,58%
τ_C (jours)	11	11	11	11	11	0	11
τ_L (jours)	82	83	82	84	83	1	83
ϕ (jours)	17	14	21	22	19	4	18
δ (jours)	120	120	120	119	120	1	120

Au delà d'un seuil de prise de masse de l'ordre de 0,3 %, les déformations et les variations massiques des corps d'épreuve sont liées par une relation affine (cf. Figure 3-5) : la RSI semble jouer le rôle de « pompe à eau » et modifie le comportement hydrique du matériau. Cette absorption peut être attribuée à l'ouverture du réseau poreux du matériau : la fissuration du corps d'épreuve facilite la pénétration d'eau (*Petrov & Tagnit-Hamou 2004, Bary 2010*). Le comportement hydrique du matériau ne semble pas en revanche être affecté par le mode de conservation (les pentes des régressions linéaires sont assez proches – cf. Tableau 3-3).


Figure 3-5 : évolution des déformations en fonction de la prise de masse – éprouvettes R1 – conservation en eau et à 100 % HR
Tableau 3-3 : régression linéaire entre déformation et variations de masse – éprouvettes R1 – conservation en eau et à 100 % HR

	Pente	Ordonnée à l'origine	Coefficient de corrélation
R1_I-H30_GL_28	0,690	-0,077%	0,9992
R1_H100-H30_GL_28	0,721	-0,182%	0,9994

3.2 Eprouvettes soumises à un séchage à 30 % HR

La Figure 3-6 représente les suivis dimensionnels et massiques des éprouvettes R1_H30-I_GL_28. Après 530 jours d'exposition, on note une perte relative de masse de l'ordre de 4 % et un retrait de dessiccation de l'ordre de -0,7 %. Il semble que le séchage sévère imposé à ces corps d'épreuve conduise au blocage de la RSI par manque d'eau.

Devant le séchage sévère imposé aux corps d'épreuve, les éprouvettes 11-22 considérées ici développent des gradients de séchage et se comportent donc comme des « mini-structures ». Il convient donc d'estimer la progression du front de séchage dans ces

corps d'épreuve. En l'absence de caractérisation des propriétés de diffusion d'un matériau, (Multon 2004) a proposé une approche permettant d'évaluer les profils de séchage dans de telles éprouvettes. Dans ce raisonnement, en considérant que les pertes de masse sont exclusivement radiales, on adopte une écriture du profil de perte de masse sous la forme de la relation (3-2). Dans cette relation, a et b sont les paramètres de la loi définissant le profil de perte de masse et sont les inconnues du problème. La Figure 3-7 illustre le résultat du modèle proposé.

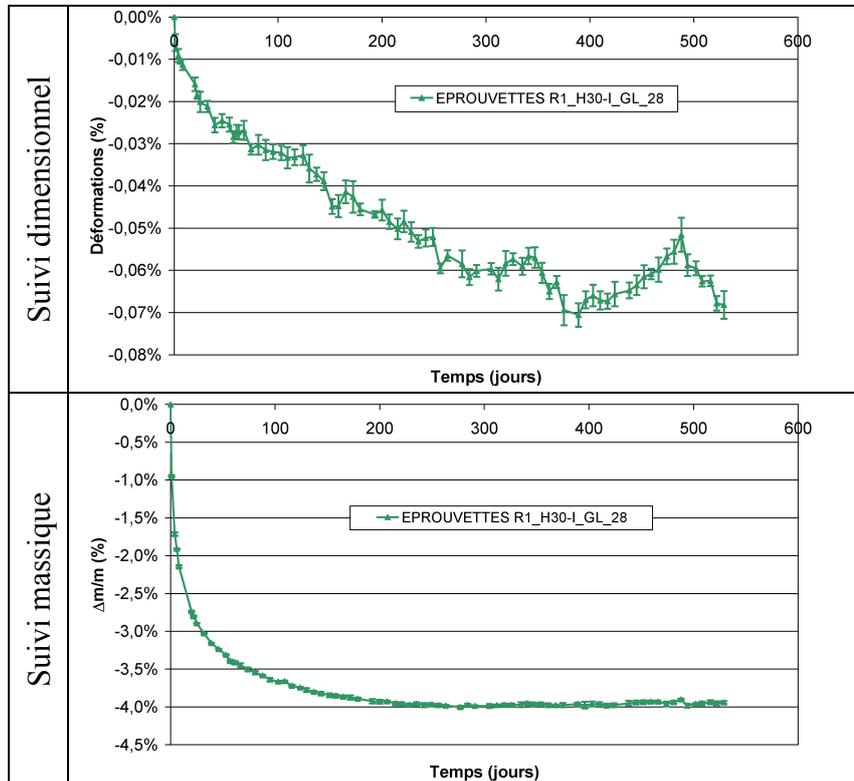


Figure 3-6 : suivis dimensionnels et massiques – éprouvettes R1 – conservation à 30 % HR

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\delta m}{m} = 2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot h \cdot (a \cdot \rho^4 + b) \cdot d\rho \\ \frac{\delta m}{m} = \text{perte de masse de la couronne de béton} \\ \rho = \text{rayon moyen de la couronne de béton} \\ d\rho = \text{épaisseur de la couronne de béton} \\ h = \text{hauteur de la couronne de béton} \end{array} \right. \quad (3-2)$$

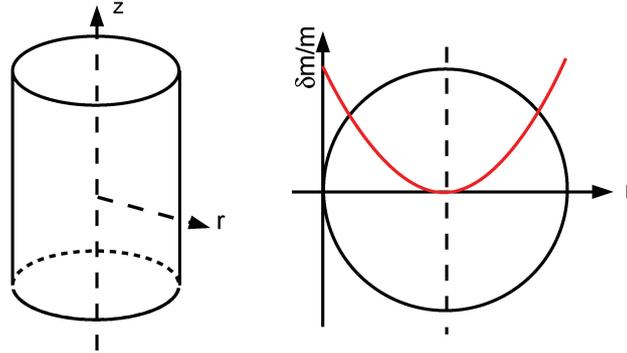


Figure 3-7 : modélisation du profil de séchage dans des éprouvettes conservées à 30 % HR

Afin d'identifier les deux constantes du modèle (a et b), il est nécessaire de disposer de deux équations. La première porte sur la variation globale de masse : l'intégrale du profil de séchage le long du rayon de l'éprouvette doit être égale à la variation relative de masse globale à chaque instant. Cette condition s'exprime mathématiquement par la relation (3-3).

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\Delta m}{m} = \int_0^R 2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot h \cdot (a \cdot \rho^4 + b) \cdot d\rho \\ \frac{\Delta m}{m} = \text{variation de masse relative globale à un instant } t \\ R = \text{rayon de l'éprouvette} \end{array} \right. \quad (3-3)$$

La seconde condition porte sur le comportement de la couronne de béton extérieure de l'éprouvette dont l'épaisseur est notée e. Une fois que cette couronne a atteint la valeur limite de séchage du matériau (dans le cas présent, 4 % pour l'éprouvette entière, cf. Figure 3-6), la condition (3-4) s'applique, en prenant garde au fait que les variations relatives de masse se calculent en référence à la masse initiale de l'élément considéré (couronne ou éprouvette entière).

Il suffit alors de résoudre le système constitué des équations (3-3) (variation massique globale) et (3-4) (variation massique locale) pour obtenir une évaluation du profil de séchage dans l'éprouvette à chaque instant.

$$\left\{ \begin{array}{l} \left. \frac{\delta m}{m} \right|_{\text{couronne}} \cdot \frac{V_{\text{éprouvette}}}{V_{\text{couronne}}} = \left(\int_{R-e}^R 2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot h \cdot (a \cdot \rho^4 + b) \cdot d\rho \right) \cdot \frac{R^2}{R^2 - (R-e)^2} = \left. \frac{\Delta m}{m} \right|_{\text{asymptotique}} \\ \left. \frac{\Delta m}{m} \right|_{\text{asymptotique}} = \text{variation relative de masse globale une fois le processus stabilisé} \\ e = \text{épaisseur de la couronne de béton extérieure} \end{array} \right. \quad (3-4)$$

La Figure 3-8 illustre la progression du front de séchage ainsi calculée au sein des éprouvettes. On observe que le séchage touche très rapidement le cœur de l'éprouvette, après seulement 8 jours d'exposition. Après 30 jours, la perte de masse s'élève à 2 % au centre du corps d'épreuve et se stabilise complètement après 300 jours à une valeur de 4 %. Cette approche, bien que relativement simple, indique qu'après une durée

d'exposition équivalente au temps de latence du gonflement en eau, la perte de masse à cœur est de l'ordre de 3 %, bloquant ainsi probablement le développement de potentiels gonflements de RSI.

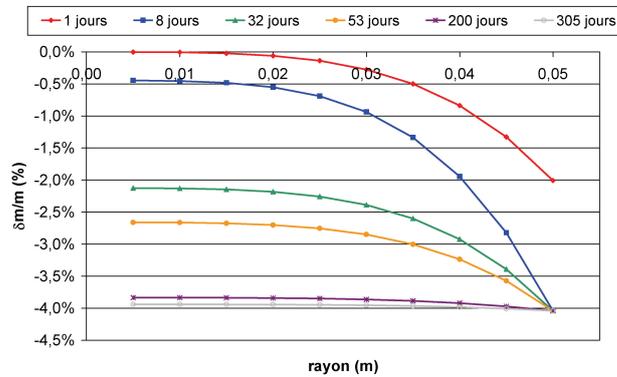


Figure 3-8 : profil de séchage des éprouvettes R1 – conservation à 30 % HR

3.3 Eprouvettes non soumises à des échanges hydriques

Afin d'évaluer la possibilité de développer une RSI sans apport d'eau extérieure, une partie des expérimentations consiste en un suivi d'éprouvettes de gonflement libre conservées sous scellement aluminium étanche (Toutlemonde & Le Maou 1996). La Figure 3-9 représente les suivis dimensionnels et massiques des éprouvettes de gonflement libre R1_S-I_GL_28.

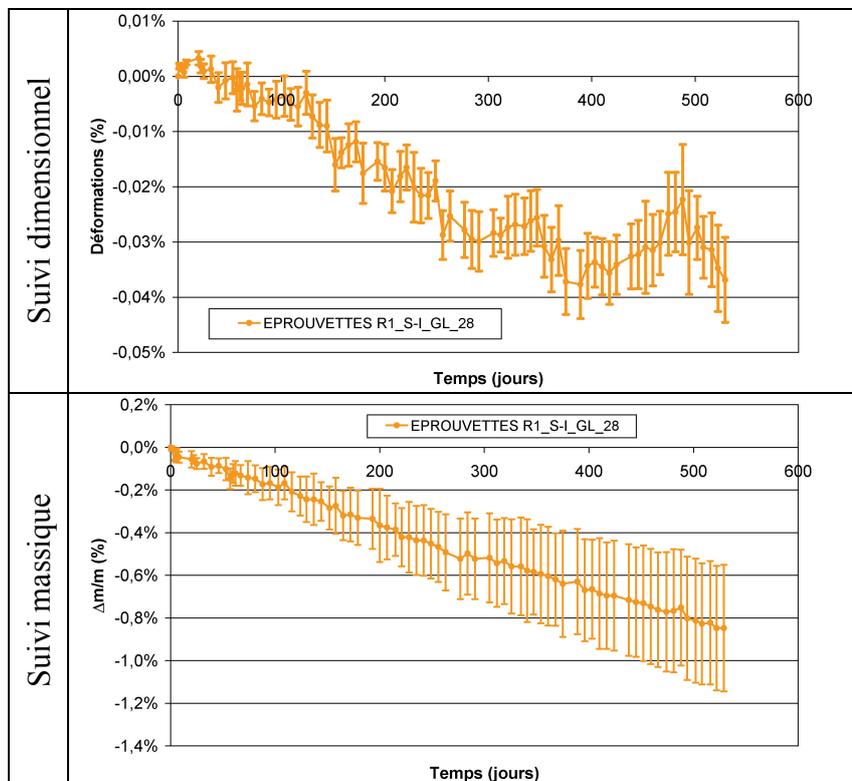


Figure 3-9 : suivis dimensionnels et massiques – éprouvettes R1 – conservation sous scellement

Aucun gonflement n'est observé durant les 530 jours d'exposition des corps d'épreuve. Les pertes de masse atteignent une valeur de -0,8 % correspondant à un retrait

de dessiccation de l'ordre de -0,4 %. Ces deux grandeurs ne semblent pas stabilisées en fin de suivi. Les pertes de masse n'ont pu être évitées et sont liées à des défauts d'étanchéité du scellement au droit des zones instrumentées : malgré toutes les précautions prises, elles se sont révélées inévitables. Ce séchage semble toutefois modéré. La question se pose alors de savoir si l'absence de gonflement est liée à un manque d'eau bloquant la réaction (manque de réactif ou HR ambiante trop faible pour permettre la formation d'ettringite [Graf 2007]) ou si les déformations sont simplement retardées par un effet de cinétique : en effet, en l'absence d'apports d'eau extérieure, la lixiviation des alcalins est impossible. Le pH interne du matériau est ainsi maintenu élevé, ralentissant de ce fait considérablement la désorption des sulfates adsorbés sur les CSH lors de la cure thermique (Divet & Randriambololona 1998). Par ailleurs, dans ces conditions, des espèces telles que les sulfates sont moins mobiles et peuvent ainsi ralentir les cinétiques d'expansion.

Les pertes d'eau sont localisées au droit des zones instrumentées. Néanmoins, pour simplifier le raisonnement, on considère la surface d'échange hydrique égale à la surface latérale de l'éprouvette, comme indiqué en section 3.2. Cette hypothèse a pour conséquence de « lisser » les profils de séchage au sein de l'éprouvette en propageant (mathématiquement) au reste de l'éprouvette les pertes de masse plus importantes localisées au niveau des zones instrumentées. Ainsi, à l'exception des zones de fuite, cette hypothèse conduit à une évaluation surestimée (et donc « sécuritaire » dans le cadre de notre raisonnement) des pertes de masse au sein du matériau. Le profil de variation de masse correspondant à la relation (3-5) est proposé. Ce modèle reprend la forme de profil de séchage pour une éprouvette en séchage sévère proposée par (Multon 2004) en l'adoucissant considérablement (modèle linéaire plutôt que d'ordre 4). Cela revient à considérer des variations de masse atténuées le long du rayon de l'éprouvette, i.e. un front de séchage beaucoup plus diffus (cf. Figure 3-10). Ce calcul n'a pas pour objectif de fournir une estimation quantifiée du séchage à cœur (les hypothèses formulées étant très fortes, notamment sur les zones d'échange hydrique) mais d'étudier qualitativement la possibilité d'un séchage à cœur pour les corps d'épreuve. Une étude numérique plus poussée avec des modèles tels que celui développé par (Ackers 1988) et (Mensi et al. 1988) permettrait de quantifier ce séchage et d'affiner les profils de perte de masse moyennant des investigations expérimentales complémentaires afin d'évaluer les propriétés de diffusion des matériaux notamment.

$$\frac{\delta m}{m} = 2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot h \cdot (a \cdot \rho + b) \cdot d\rho \quad (3-5)$$

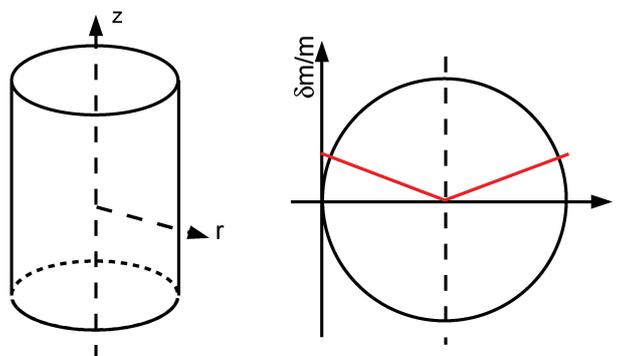


Figure 3-10 : modélisation du profil de séchage dans des éprouvettes conservées sous scellement aluminium

Le système d'équations à résoudre est alors le suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\Delta m}{m} = \int_0^R 2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot h \cdot (a \cdot \rho + b) \cdot d\rho \\ \frac{\Delta m}{m} = \text{variations de masse des éprouvettes conservées sous scellement} \end{array} \right. \quad (3-6)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\int_{R-e}^R 2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot h \cdot (a \cdot \rho + b) \cdot d\rho \right) \cdot \frac{R^2}{R^2 - (R - e)^2} = \frac{\Delta m}{m} \Big|_{\text{asymptotique}} \\ \frac{\Delta m}{m} \Big|_{\text{asymptotique}} = \text{asymptote de perte de masse des éprouvettes} \\ \text{séchées à 30 \% HR} \end{array} \right. \quad (3-7)$$

Dans l'équation (3-7), le second membre est pris égal à la variation massique des éprouvettes séchées à 30 % HR après stabilisation : en effet, cette valeur limite est identique pour les éprouvettes séchées et pour les éprouvettes conservées sous scellement : les évolutions massiques des éprouvettes conservées sous scellement sont plus lentes mais l'humidité interne d'équilibre des matériaux est la même, quel que soit le revêtement appliqué en surface de l'éprouvette. Cette valeur est en effet propre aux propriétés d'échange des matériaux et aux conditions de séchage imposées.

La Figure 3-11 représente les profils de séchage obtenus suivant l'approche proposée. Le cœur de l'éprouvette ne semble que très peu touché par le séchage après 530 jours d'exposition. Tout en gardant à l'esprit les approximations réalisées dans cette section, ceci semble indiquer qualitativement que le béton à cœur de l'éprouvette est encore très humide en fin de suivi (variation massique inférieure à 0,1 % après une période d'exposition similaire au temps de latence des gonflements en atmosphère humide). Ainsi, il est possible que la réaction soit encore dans sa période latente à ce stade des expérimentations et donc que les gonflements se développent plus tardivement. Si on réalise une analogie avec les observations *in situ*, ceci correspondrait au cas d'élément d'ouvrages ayant gonflé tardivement sans être soumis à un apport d'eau marqué (cas d'un chevêtre massif de pont sous un tablier par exemple) : des mouvements hydriques lents auraient pour conséquence de retarder les gonflements.

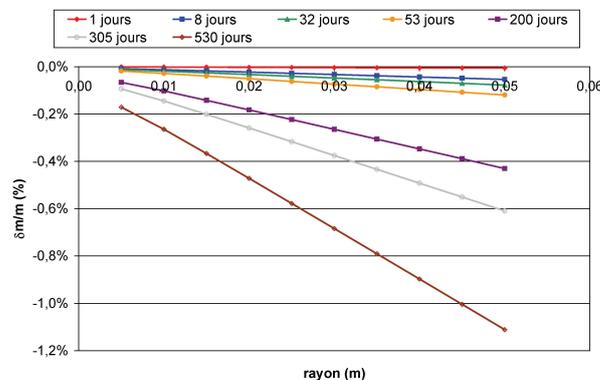


Figure 3-11 : profil de séchage des éprouvettes R1 – conservation sous scellement

Ces résultats indiquent en tout état de cause qu'aucun gonflement de RSI ne s'est déclaré au cours des 530 jours de suivi des corps d'épreuve R1 (on mesure même un retrait). Le programme expérimental de suivi des performances mécaniques lors du développement d'expansions a été prévu pour des corps d'épreuve conservés sous scellement hydrique (cf. Chapitre 2). L'absence de gonflements sur la période de suivi n'a pas non plus permis d'observer de variations des caractéristiques mécaniques. Afin d'étudier ces phénomènes, une caractérisation mécanique sur des éprouvettes conservées en eau ou à 100 % HR pourrait être envisagée. Une telle étude n'a pu être réalisée dans le cadre de ces travaux. Néanmoins, des essais mécaniques sur des cylindres conservés en eau sont prévus à l'issue de la phase de vieillissement des poutres (soit après environ deux ans).

3.4 Conclusions

Cette section présente les résultats des essais de gonflement libre sur la formule R1 visant à quantifier le couplage entre gonflements d'une formule développant une RSI intense et l'humidité environnante. Les résultats obtenus confirment ceux issus de la littérature (e.g. *Famy et al. 2001*) : les gonflements sont d'autant plus rapides et conséquents que l'humidité environnante est importante. Ceci peut notamment provenir de la lixiviation des alcalins en milieu aqueux qui favorise la désorption des sulfates et donc la précipitation d'ettringite (*Brown & Bothe 1993, Divet & Randriambololona 1998*) mais également de la présence d'eau en quantité plus importante, réactif utile à la formation d'ettringite. Par ailleurs, la présence d'eau liquide dans le matériau poreux facilite les transports de réactifs. On notera toutefois que, même si les écarts d'amplitude d'expansion sont significatifs, ils ne conduisent pas à des différences « dramatiques » de résultats (écart relatif d'amplitudes de l'ordre de 20 % entre le cas I et le cas H100 pour la formule R1).

Les éprouvettes soumises à un séchage sévère à 30 % HR ne montrent aucun gonflement mais plutôt un retrait sur toute la période de suivi. Cette absence d'expansion est attribuée au séchage rapide du matériau jusqu'au cœur des corps d'épreuve : en dessous d'un certain seuil d'humidité, la RSI ne peut se développer par manque d'eau (existence d'un seuil de HR de l'ordre de 90-92 % en dessous duquel la RSI ne se déclenche plus [*Graf 2007*]). Cette raréfaction de l'eau peut induire un manque de réactif et/ou une limitation du transport des réactifs utiles à la formation d'ettringite.

Les éprouvettes pour lesquelles les échanges hydriques avec le milieu extérieur sont limités (scellement aluminium) n'ont pas présenté de gonflements après 530 jours de suivi mais également un retrait. L'évaluation du profil de séchage au sein de ces corps d'épreuve semble montrer qu'une grande partie du matériau est maintenue à une humidité importante (perte de masse inférieure à 0,1 % à cœur après une durée d'exposition équivalente au temps de latence des expansions en milieu humide). Ainsi, la possibilité de gonflements retardés (par l'absence de lixiviation des alcalins notamment) et non supprimés reste envisageable. Néanmoins, des investigations expérimentales complémentaires menées à long terme sont nécessaires pour confirmer ce point.

4 Cas du couplage entre RSI et RAG

La RSI et la RAG sont deux pathologies aux effets macroscopiques similaires. Il est donc délicat d'identifier la réaction responsable des désordres sur un ouvrage atteint (*Godart et al. 2004, Ekolu et al. 2007a*). Certains travaux montrent en outre que les deux

réactions peuvent être responsables simultanément des désordres observés (*Shayan & Quick 1992, Johansen et al. 1993, Thomas et al. 2008*). Néanmoins, la formulation d'un diagnostic se révèle particulièrement délicate, comme en attestent par exemple les travaux de (*Tepponen & Ericksson 1987*) et (*Shayan & Quick 1994*) : les premiers établissent un lien direct entre la dégradation de traverses de chemin de fer et le développement de RSI tandis que les seconds l'attribuent à la RAG. L'étude des données disponibles dans la littérature révèle ainsi de nombreux cas de controverses quant à l'attribution des désordres à l'une ou l'autre des pathologies. En tout état de cause, l'établissement d'un diagnostic clair ne semble pas pouvoir faire l'économie d'observations microscopiques (*Marusin 1994*) et d'essais en laboratoire (*Thomas et al. 2008*). De plus, outre des effets macroscopiques proches pour les deux réactions, la difficulté de diagnostic trouve également sa source dans les couplages chimiques et mécaniques entre les deux réactions (*Pettifer & Nixon 1980, Brown & Bothe 1993, Shayan & Ivanusec 1996, Ekolu et al. 2007b*). Pour certains auteurs, la RAG semble être une condition initiatrice de la RSI (*Diamond & Ong 1994*). La présente section détaille les expérimentations mises en œuvre dans ce programme pour compléter les connaissances déjà existantes sur les couplages entre RSI et RAG et leurs effets mécaniques, et pour disposer de données quantifiées utiles à la modélisation de ces phénomènes souvent concomitants *in situ* (*Shayan & Quick 1992, Mielenz et al. 1995, Meland et al. 1997, Thomas et al. 2008, Santos Silva et al. 2008*).

4.1 Eprouvettes immergées

La Figure 3-12 compare les suivis dimensionnels et massiques des éprouvettes R2_I-H30_GL_28 et R1_I-H30_GL_28. On observe que les cinétiques de gonflement sont plus rapides dans le cas d'une superposition entre RSI et RAG (formule R2) que dans le cas d'une RSI simple (formule R1) comme en atteste le calage des paramètres de la loi de gonflement libre (cf. Tableau 3-4) : le temps caractéristique et le temps de latence sont plus faibles dans les cas des corps d'épreuve R2. En revanche, les amplitudes de gonflement sont équivalentes (écarts similaires à la dispersion des résultats présentés dans le Tableau 3-2). Ce constat pose la question d'un éventuel rôle initiateur de la RAG vis-à-vis de la RSI dans les conditions expérimentales que nous appliquons. Cet effet déclencheur peut s'expliquer potentiellement par deux types de couplages entre RSI et RAG :

- Couplage physique :

La RAG est une réaction thermoactivée : il se peut qu'elle se développe de manière conséquente lors de la phase de cure thermique (*Diamond & Ong 1994, Shayan & Ivanusec 1996, Ekolu et al. 2007-a*), induisant ainsi une microfissuration initiale qui peut constituer une faiblesse du matériau favorable à la précipitation d'ettringite et aux gonflements (*Fu et al. 1994, Ekolu et al. 2007-a*) et facilitant la circulation d'eau liquide dans les matériaux.

- Couplage chimique :

La formation de gels de RAG implique une consommation d'alcalins qui peut se révéler favorable à la précipitation d'ettringite (*Brown & Bothe 1993*). Ainsi, le développement de RAG durant la cure thermique pourrait logiquement accélérer le démarrage des gonflements de RSI lors de la phase de stockage des corps d'épreuve. Par ailleurs, la microfissuration induite par la formation des gels peut également faciliter les mouvements d'eau au sein du matériau et donc la lixiviation des alcalins (et le transport

des réactifs). Ceci accélérerait d'autant plus la désorption des sulfates contenus dans les CSH (*Divet & Randriambololona 1998*) et donc la précipitation d'ettringite.

Il convient ici de noter que, si cet effet initiateur était avéré, cette conclusion ne s'appliquerait que dans les conditions expérimentales spécifiques correspondant à ces essais (i.e. pour ces compositions, ce traitement thermique et ce mode de conservation thermo-hydrigue). En effet, les couplages potentiels entre ces deux réactions sont tels qu'une modification de la cure thermique ou de la température de conservation par exemple pourrait conduire à un comportement expansif totalement différent en favorisant plus une réaction par rapport à l'autre.

Tableau 3-4 : calage des paramètres du modèle de gonflement libre – éprouvettes R1 et R2 – conservation en eau

	R1_I-H30_GL_28	R2_I-H30_GL_28
ε_{∞}	1,58%	1,55%
τ_C (jours)	11	9
τ_L (jours)	83	62
ϕ (jours)	18	15
δ (jours)	120	120

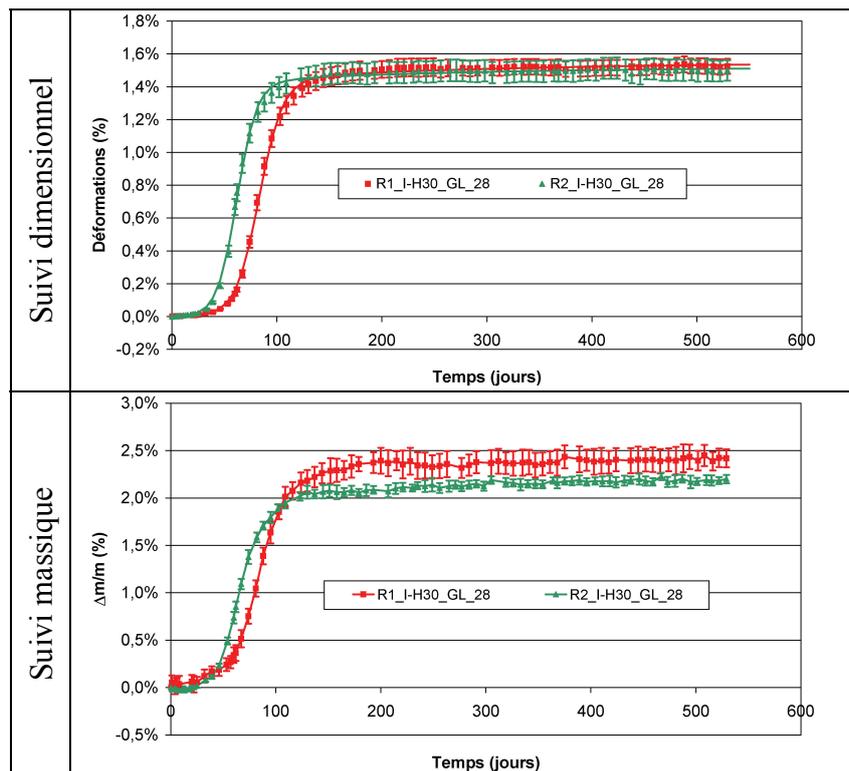


Figure 3-12 : comparaison des suivis dimensionnels et massiques des éprouvettes R1 et R2 – conservation en eau

La Figure 3-13 compare l'évolution des déformations en fonction des variations relatives de masse pour les éprouvettes de gonflement libre R1 et R2 conservées en eau. Les paramètres issus de la régression linéaire de ces données sont reportés dans le Tableau 3-5. On note l'existence d'une relation affine entre déformations et variations de masse. De plus, ces données révèlent des comportements hydriques similaires des deux matériaux puisque les pentes de régression sont comparables.

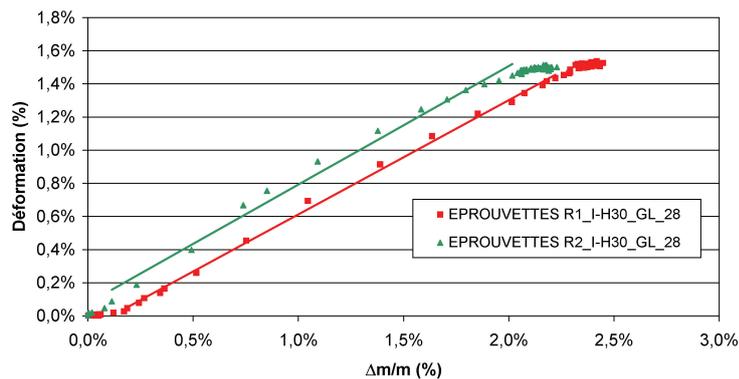


Figure 3-13 : évolution des déformations en fonction de la prise de masse – éprouvettes R1 et R2 – conservation en eau

Tableau 3-5 : régression linéaire entre déformation et variations de masse – éprouvettes R1 et R2 – conservation en eau

	Pente	Ordonnée à l'origine	Coefficient de corrélation
R1_I-H30_GL_28	0,690	-0,077%	0,9992
R2_I-H30_GL_28	0,716	0,076%	0,9936

4.2 Eprouvettes conservées sous 100 % HR

4.2.1 Suivi massique et dimensionnel

La Figure 3-14 représente les suivis dimensionnels et massiques des éprouvettes de gonflement libre R2_I-H30_GL_28 et R2_H100-H30_GL_28. Dans un premier temps, on observe un comportement du matériau R2 similaire à celui du béton R1 (cf. Figure 3-4) : les éprouvettes conservées en eau développent des gonflements de manière plus importante et plus rapide que les éprouvettes conservées en atmosphère saturée (phases 1 et 2 d'une durée d'une centaine de jours, cf. Figure 3-14). A la fin de la phase 2, on observe une poursuite marquée des déformations des éprouvettes conservées à 100 % HR contrairement aux éprouvettes R1 qui atteignent un palier de déformation à ce stade (cf. Figure 3-4). Ces gonflements se poursuivent de manière significative durant 200 jours jusqu'à dépasser nettement le potentiel de déformation évalué lors du suivi des éprouvettes R2_I-H30_GL_28 (phase 3). Les déformations des corps d'épreuve conservés à 100 % HR se stabilisent alors et atteignent un palier de l'ordre de 2,1 % (contre 1,5 % pour des éprouvettes immergées). Durant la phase 3, on note le développement de fissures importantes (ouverture de l'ordre du millimètre, cf. Figure 3-15) apparaissant de manière beaucoup plus localisée que pour le matériau R1. Ceci suggère qu'un mécanisme d'expansion de RAG pourrait être mis en jeu durant cette phase (faciès de fissuration cohérent avec cette réaction).

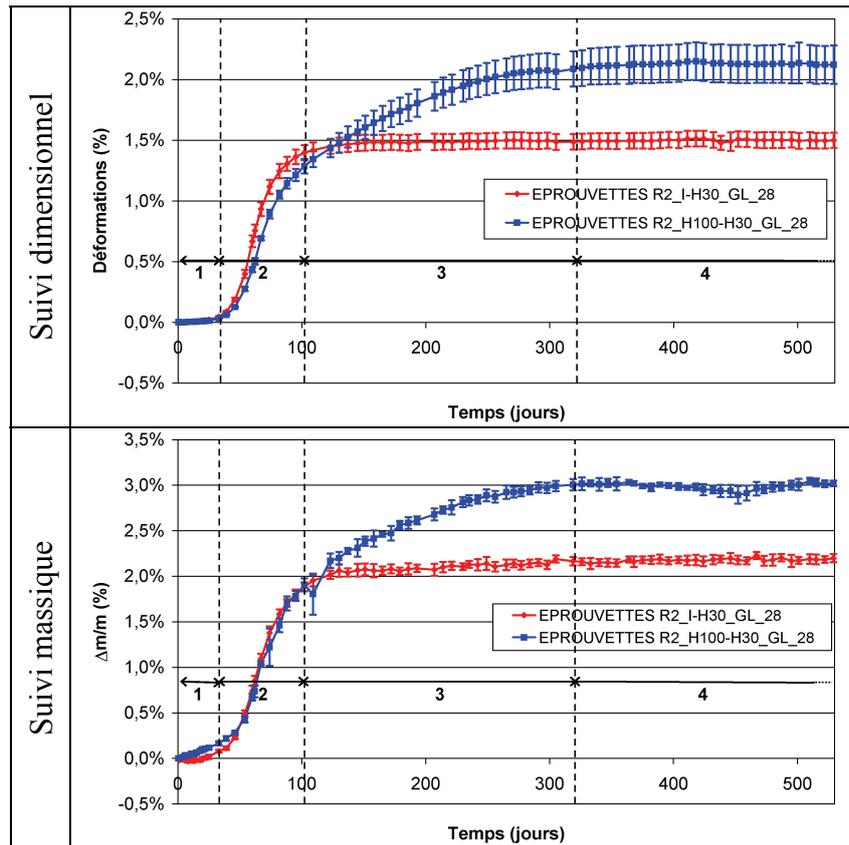


Figure 3-14 : comparaison des suivis dimensionnels et massiques des éprouvettes R2 – conservation en eau et à 100 % HR

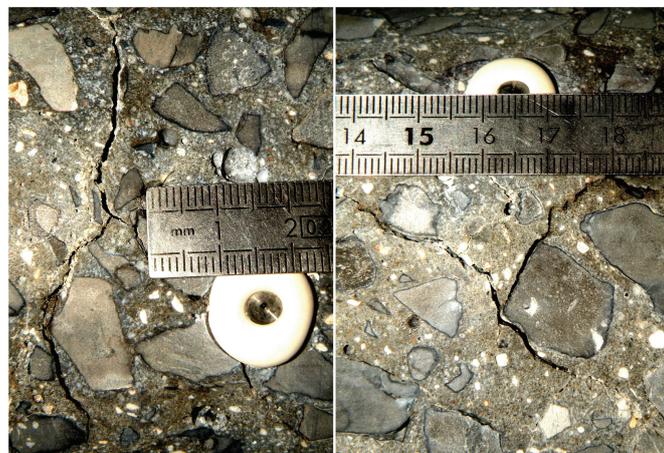


Figure 3-15 : fissuration d'une éprouvette de gonflement libre R2 après 400 jours de conservation à 100 % HR

La Figure 3-16 compare l'évolution des déformations en fonction des variations de masse des éprouvettes R1 et R2 conservées à 100 % HR. Malgré des gonflements nettement plus importants pour les éprouvettes atteintes de RSI et de RAG, on observe un comportement hydrique similaire des deux matériaux. Ceci est confirmé par la réalisation d'une régression linéaire sur ces données : le Tableau 3-6 indique des pentes similaires pour les deux matériaux.

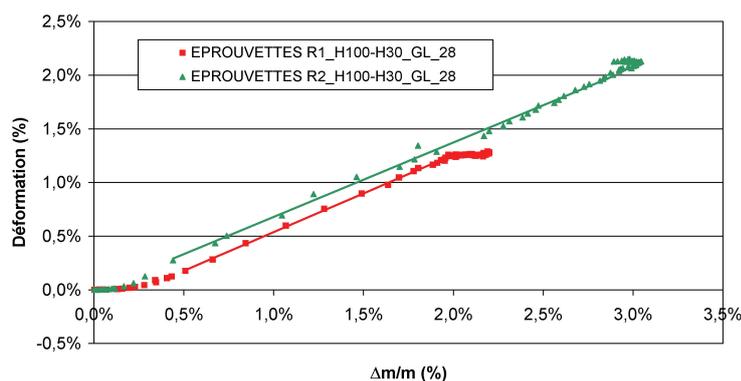


Figure 3-16 : évolution des déformations en fonction de la prise de masse – éprouvettes R1 et R2 – conservation à 100 % HR

Tableau 3-6 : régression linéaire entre déformation et variations de masse – éprouvettes R1 et R2 – conservation à 100 % HR

	Pente	Ordonnée à l'origine	Coefficient de corrélation
R1_H100-H30_GL_28	0,721	-0,182%	0,9994
R2_H100-H30_GL_28	0,694	-0,014%	0,9977

4.2.2 Mécanisme de gonflement suggéré

La poursuite des gonflements du béton R2 en fin de phase 2 (cf. Figure 3-14) peut potentiellement s'expliquer par un couplage entre RSI et RAG et par l'effet de la lixiviation des alcalins.

Dans un premier temps, que les corps d'épreuve R2 soient conservés en eau ou en atmosphère saturée, on observe une phase latente (phase 1, cf. Figure 3-14) : aucun gonflement n'est mesuré macroscopiquement. En revanche, à l'échelle microscopique, il est possible qu'une préfissuration du matériau soit engendrée par la formation de gels de RAG, notamment durant la cure thermique. Cette considération serait en accord avec plusieurs études reportées dans la littérature (*Diamond & Ong 1994, Shayan & Ivanusec 1996, Ekolu et al. 2007-a*). De plus, la température de stockage des corps d'épreuve (38°C) semble favorable au développement de la RAG au moins initialement. Néanmoins, très peu de gels de RAG ont été observés à l'échelle microscopique à l'issue de la cure thermique, ce qui pose la question de la possibilité de développer une fissuration significative dans le matériau durant cette phase expérimentale. A la lumière des résultats de notre étude, il apparaît délicat d'apporter une réponse définitive à cette interrogation.

Lors de la deuxième phase, on peut supposer que les déformations considérables mesurées (supérieures à 1 % que ce soit dans le cas d'une immersion ou d'une conservation à 100 % HR) sont imputables pour l'essentiel à la RSI (phase 2, cf. Figure 3-14). En effet, bien que les corps d'épreuve soient conservés à une température de 38°C, l'amplitude et la cinétique des déformations mesurées semblent plus cohérentes avec cette pathologie qu'avec la RAG (les temps caractéristiques issus de cette étude sont en particulier beaucoup plus courts que ceux présentés par [*Multon 2004*] dans le cas d'une RAG pure). Les gonflements induisent alors l'ouverture du réseau poreux du matériau. Dans le cas des éprouvettes conservées en eau, ceci entraîne une entrée d'eau importante potentiellement responsable d'une lixiviation des alcalins. En revanche, pour les éprouvettes conservées à 100 % HR, ce phénomène est probablement nettement moins important du fait de la moins grande quantité d'eau liquide au sein de la matrice. Des essais quantitatifs sont présentés en section 4.2.4.2 pour justifier ce point.

Dans un troisième temps, une fois la RSI en « perte de vitesse » (i.e. lorsqu'un matériau atteint d'une RSI seule atteint un palier de déformation), la poursuite des déformations dans le cas des éprouvettes conservées en atmosphère saturée peut s'expliquer par la formation de gels de RAG. En effet, les éprouvettes immergées sont à ce stade des expérimentations pauvres en alcalins. Il n'y a donc pas suffisamment de réactifs dans le matériau pour la formation de produits expansifs et on atteint par conséquent un palier de déformation. En revanche, les éprouvettes conservées à 100 % HR peuvent encore être suffisamment riches en alcalins pour permettre la formation de gels de RAG induisant une poursuite des déformations comme indiqué par la phase 3 des gonflements (cf. Figure 3-14).

Enfin, lorsque la totalité des alcalins disponibles dans le matériau a été consommée (soit pour la formation des gels, soit par lixiviation tout de même possible dans le cas de corps d'épreuve conservés à 100 % HR), les réactions de gonflement interne s'arrêtent et on atteint alors un palier de déformation.

La Figure 3-17 propose une représentation schématique du mécanisme proposé.

Ce mécanisme est basé sur l'hypothèse d'un développement de la RSI préalablement à la RAG. Il faut néanmoins garder à l'esprit que cette « priorité » d'une réaction par rapport à une autre peut être fonction de nombreux paramètres tels que la formulation du béton, les conditions de conservation thermiques (a priori ici favorable à la RAG) et hydriques et bien sûr l'histoire thermique du matériau au jeune âge. On va dans la suite de ce mémoire vérifier les hypothèses associées à l'explication proposée.

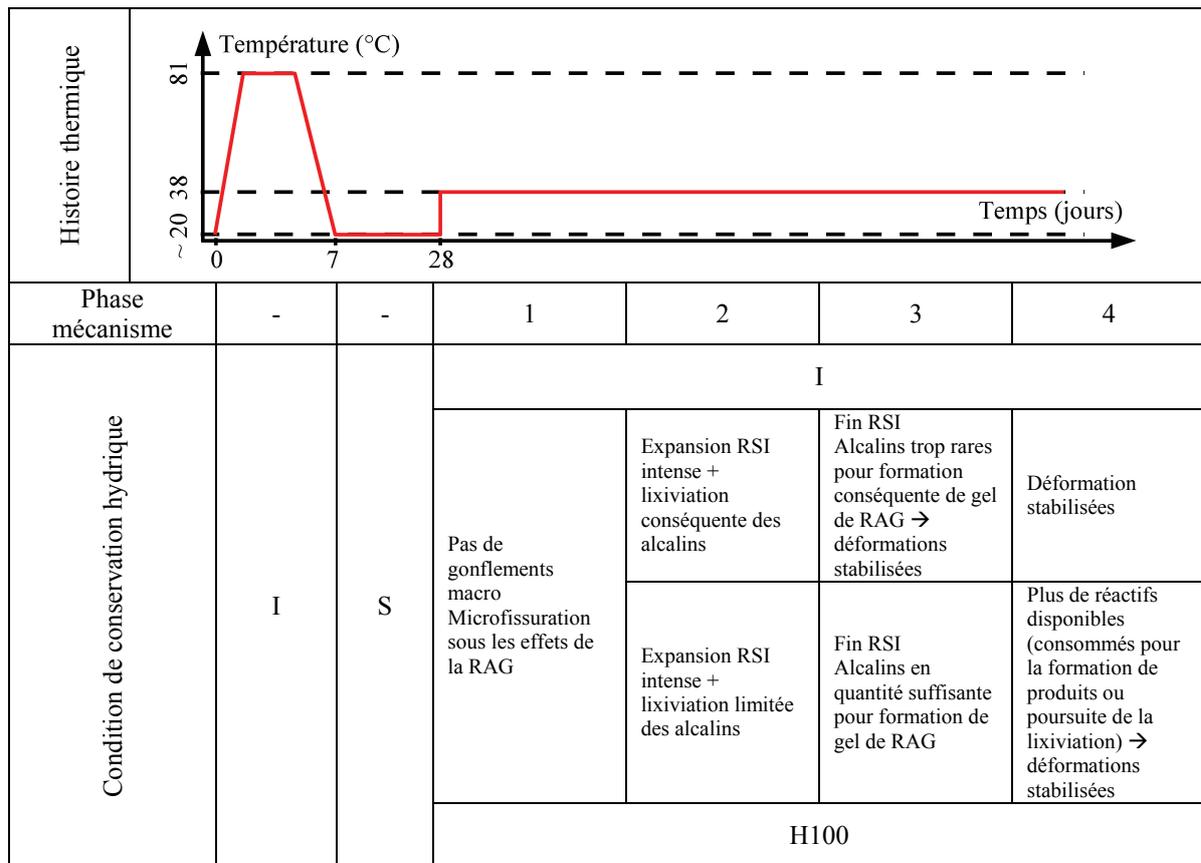


Figure 3-17 : mécanisme de couplage RSI-RAG proposé

4.2.3 Modélisation proposée

La Figure 3-18 représente graphiquement les modèles de gonflement libre développés par (*Brunetaud 2005*) pour la RSI et (*Larive 1998*) pour la RAG après calage des paramètres par la méthode des moindres carrés. L'application numérique du modèle décrivant la RSI ne permet pas de définir un jeu de paramètres physiquement réalistes : le paramètre Φ est supérieur à δ et le modèle conduit donc à l'évaluation d'avancement négatifs pour la réaction (cf. Tableau 3-7). Le modèle décrivant la RAG ne permet pas non plus de déterminer un jeu de paramètres reproduisant de manière satisfaisante les résultats expérimentaux. Ainsi, ces deux lois disponibles dans la littérature ne semblent pas être adaptées à la description des phénomènes observés lors du suivi des éprouvettes atteintes de RSI et de RAG et conservées à 100 % HR.

Tableau 3-7 : calage des paramètres des lois de gonflement libre RSI et RAG

	RSI (Brunetaud)	RAG (Larive)
ε_{∞}	2,44%	2,10%
τ_C (jours)	7	44
τ_L (jours)	55	87
ϕ (jours)	53	-
δ (jours)	13	-

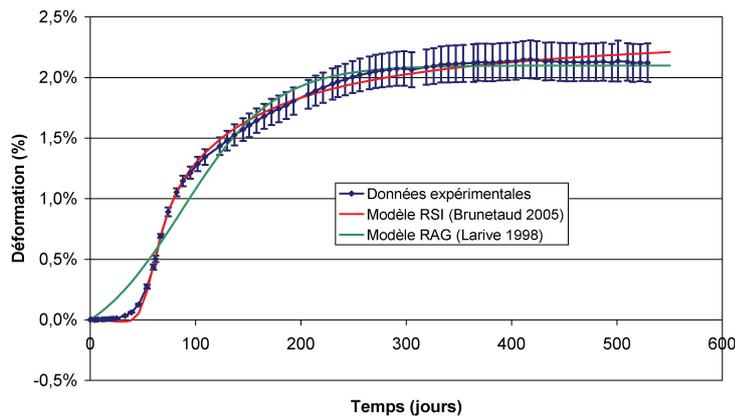


Figure 3-18 : comparaison des modèles de gonflement libre de (*Brunetaud 2005*) et (*Larive 1998*) appliqués au suivi dimensionnel des corps d'éprouve R2_H100-H30_GL_28

Le modèle mathématique donné par l'équation (3-8) est proposé pour décrire les gonflements libres des éprouvettes R2_H100-H30_GL_28. A l'instar du mécanisme exposé en section 4.2.2, ce modèle découple mathématiquement les phénomènes expansifs en sommant une contribution RSI (modèle de [*Brunetaud 2005*]) et une contribution RAG (modèle de [*Larive 1998*]).

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_{RSI} + \varepsilon_{RAG} = \varepsilon_{\infty_RSI} \cdot \frac{1 - e^{-\left(\frac{t}{\tau_{C_RSI}}\right)}}{1 + e^{-\left(\frac{t - \tau_{L_RSI}}{\tau_{C_RSI}}\right)}} \cdot \left(1 - \frac{\phi}{\delta + t}\right) + \varepsilon_{\infty_RAG} \cdot \frac{1 - e^{-\left(\frac{t}{\tau_{C_RAG}}\right)}}{1 + e^{-\left(\frac{t - \tau_{L_RAG}}{\tau_{C_RAG}}\right)}} \quad (3-8)$$

La Figure 3-19 compare les prévisions du modèle de l'équation (3-8) aux données expérimentales. On constate que cette formulation mathématique semble être bien adaptée à la description des phénomènes observés lors du suivi des éprouvettes R2_H100-

H30_GL_28. Néanmoins, il convient de noter qu'une décomposition mathématique telle que celle proposée par le modèle présente l'inconvénient de ne pas être unique. Toutefois, étant donné la description de chaque membre de l'équation (3-8), l'expérimentateur peut évaluer la pertinence de la solution obtenue sur la base des amplitudes et des cinétiques évaluées. La Figure 3-19 représente également graphiquement l'importance de chacune des contributions « RSI » et « RAG » du modèle.

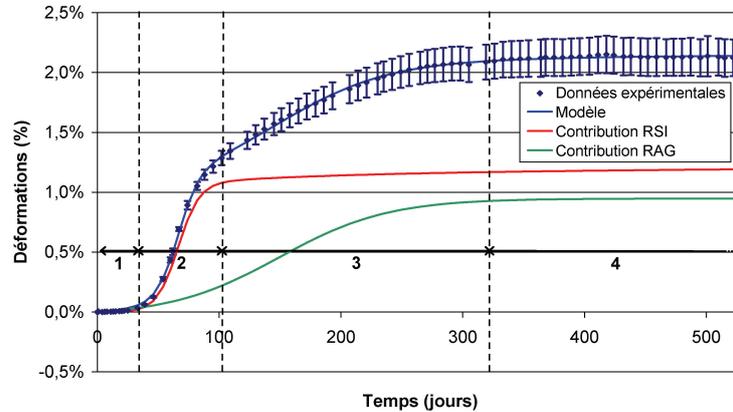


Figure 3-19 : corrélation du modèle proposé avec les données expérimentales et importance relative des contributions RSI et RAG

Tableau 3-8 : calage des paramètres du modèle de gonflement libre – éprouvettes R2 – conservation à 100 % HR

ε_{∞} RSI	τ_C RSI (j)	τ_L RSI (j)	ϕ (j)	δ (j)	ε_{∞} RAG	τ_C RAG (j)	τ_L RAG (j)
1,24%	9	66	26	119	0,95%	45	149

La fraction RSI semble cohérente avec les observations faites pour les corps d'épreuve coulés à l'aide de la formule R1 (cf. Figure 3-20) : le temps de latence est plus long pour les corps d'épreuve conservés en atmosphère saturée tandis que les cinétiques semblent équivalentes dans le cas du béton R2 comme l'indique le Tableau 3-9. En termes d'amplitude, si les potentiels de gonflement des éprouvettes immergées sont très proches, on note un écart un peu plus important entre le potentiel de gonflement des éprouvettes R1 conservées à 100 % HR (évalué expérimentalement à environ 1,3 %) et celui des éprouvettes R2 correspondantes (évalué à 1,24 % à temps infini par le modèle ; en fin d'expérimentations, à $t = 530$ jours, il est de l'ordre de 1,2 %). L'importance de cet écart reste toutefois comparable à la dispersion de l'amplitude d'expansion notée au sein d'une même famille d'éprouvettes (cf. Tableau 3-2).

Tableau 3-9 : comparaison des paramètres de modélisation des comportements RSI pour les formules R1 et R2 conservées en eau ou à 100 % HR

	R1_I-H30_GL_28	R1_H100-H30_GL_28	R2_I-H30_GL_28	R2_H100-H30_GL_28
ε_{∞}	1,58%	1,31%	1,55%	1,24%
τ_C (j)	11	13	9	9
τ_L (j)	83	89	62	66
ϕ (j)	18	18	15	26
δ (j)	120	120	120	119

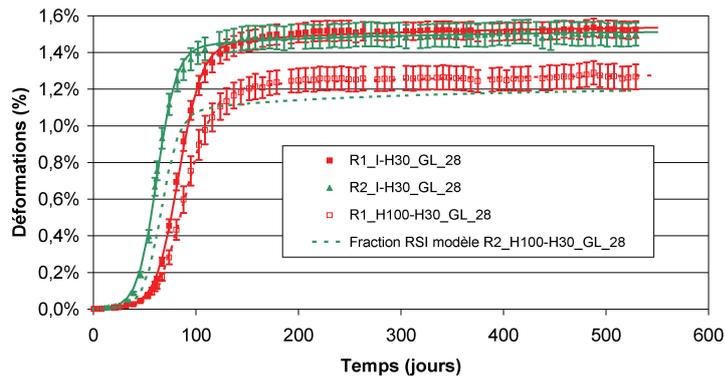


Figure 3-20 : comparaison de la fraction RSI du modèle de gonflement libre des éprouvettes R2_H100-H30_GL_28 au comportement réel de la formule R1 conservée en eau et à 100 % HR

La fraction RAG du modèle est cohérente avec le mécanisme proposé en section 4.2.2 : les phénomènes expansifs se développent de manière importante après une centaine de jours, une fois la fraction RSI « consommée » dans sa plus grande partie. La cinétique évaluée est cohérente avec celles présentées par (Multon 2004) dans des conditions d'exposition similaires et avec des bétons utilisant la même source de granulats. Néanmoins, avec une amplitude estimée à 0,95 %, la contribution RAG du modèle semble bien supérieure aux ordres de grandeurs estimés habituellement pour une RAG (Multon 2004). Cette fraction du modèle n'est probablement pas à considérer comme une RAG « pure » : il existe certainement un mécanisme d'entraînement chimique entre la RSI et la RAG à ce stade : les gels, en consommant les alcalins du matériau, contribuent à la diminution du pH interne, favorisant alors la poursuite de la désorption des sulfates adsorbés par les CSH (Brown & Bothe 1993) et donc la précipitation d'ettringite (Divet & Randriambololona 1998). Ceci peut avoir pour conséquence d'augmenter le potentiel de gonflement. Il est ainsi difficile d'attribuer ce dernier à une pathologie en particulier, les phénomènes de gonflement étant issus à la fois de la RSI et de la RAG dans ce cas. En tout état de cause, il convient d'évaluer expérimentalement le potentiel de RAG du matériau R2 afin d'évaluer la pertinence du modèle proposé.

4.2.4 Investigations complémentaires utiles à l'évaluation de la pertinence du modèle de superposition RAG-RSI

4.2.4.1 Evaluation du potentiel de RAG de la formule R2

4.2.4.1.1 Suivis dimensionnel et hydrique

Afin d'estimer la pertinence de l'amplitude de RAG déterminée par le modèle de la section 4.2.3, des essais de gonflement libre ont été réalisés pour le béton R3 (de composition identique à R2 mais non soumis à une cure thermique au jeune âge) et pour le béton R2 conservés dans une solution alcaline (favorisant ainsi la RAG au détriment de la RSI). L'objectif est ici d'identifier la contribution de RAG de la formule R2.

La Figure 3-21 représente les suivis dimensionnels et massiques des éprouvettes R3_I-H30_GL_28. Le Tableau 3-10 donne l'estimation des paramètres obtenus pour le modèle développé par (Larive 1998) pour la description des gonflements libres de RAG : on évalue le potentiel de gonflement de la formule R3 à 0,16 %. Cette valeur se révèle être bien inférieure aux 0,95 % estimés par le modèle. Néanmoins, trois points sont à garder en mémoire pour l'interprétation de ces données : premièrement, dans le cadre de l'évaluation

du potentiel de RAG par le modèle de la section 4.2.3, le couplage chimique entre RSI et RAG peut influencer sur le potentiel (par le biais de la consommation des alcalins notamment) ; deuxièmement, la RAG est une réaction thermoactivée : la cure thermique a donc une influence importante sur l'amplitude de gonflement du matériau mesurée lors de la phase de suivi qu'il convient d'évaluer ; troisièmement, l'application d'une cure thermique à un matériau conduit à une modification de la microstructure de celui-ci par rapport à un béton de composition identique mais non soumis à un échauffement.

Tableau 3-10 : comparaison des paramètres de modélisation des gonflements libres des corps d'épreuve R2_I-H30_GL_28, R3_I-H30_GL_28 et R2_I_GLA_28

	R2_I-H30_GL_28	R2_I_GLA_28	R3_I-H30_GL_28
ε_{∞}	1,55%	1,05%	0,16%
τ_C (jours)	9	11	20
τ_L (jours)	62	78	124
ϕ (jours)	15	66	-
δ (jours)	120	151	-

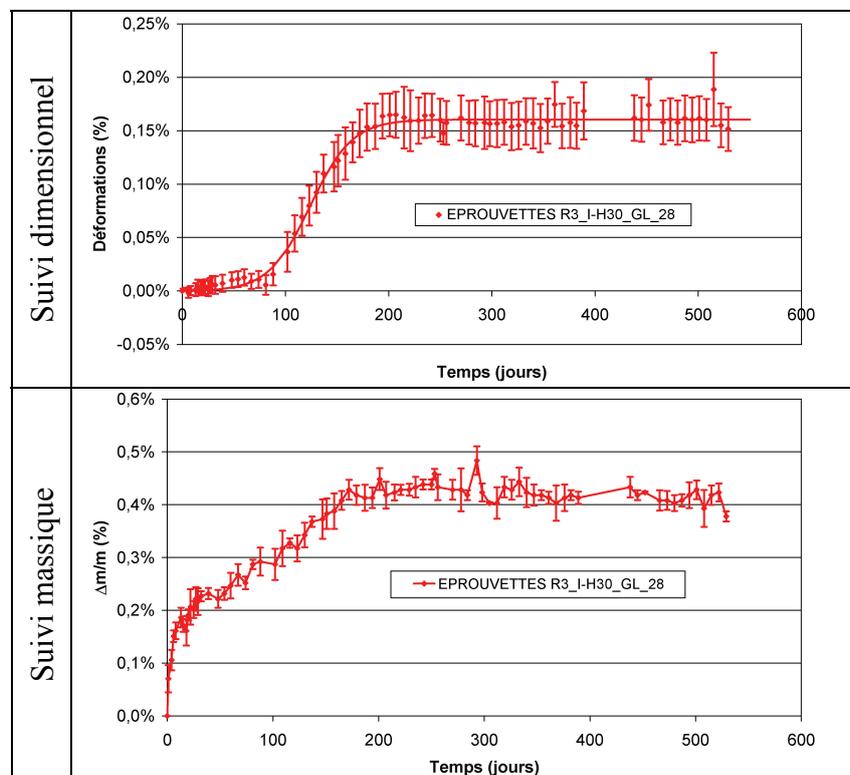


Figure 3-21 : suivis dimensionnels et massiques – éprouvettes R3 – conservation en eau

La Figure 3-23 compare les suivis dimensionnels et massiques des éprouvettes R2_I-H30_GL_28, R3_I-H30_GL_28 et R2_I_GLA_28 (formule R2 conservée dans une solution concentrée en KOH à hauteur de 1 mol/L). Des essais de porosité sur les matériaux NR et R1 ont conduit à l'évaluation d'une porosité moyenne de 14,6 %. En l'absence de données pour le formule R2, nous considérerons que ce matériau a une porosité similaire (on gardera à l'esprit que les formules de béton ont été mises au point avec cet objectif). Ainsi, pour un matériau saturé, le volume de solution interstitielle est de 146 litres dans un mètre cube. Le matériau peut donc contenir au maximum 146 mol de KOH soit 73 mol de K_2O . Ceci correspond à $0,658 \times 73 \times 94,2$ g/mol soit $4,525$ kg/m³ de Na_2O_{eq} soit 1,1 % de la masse de ciment en « régime stationnaire », teneur légèrement

supérieure à la teneur initiale de 1 %. Cette quantité d'alcalins ne représente probablement pas la teneur finale en alcalins du matériau : en régime transitoire, la pénétration des ions K^+ de la solution de stockage est combinée à la lixiviation des ions Na^+ de la solution interstitielle (homogénéisation des concentrations entre l'éprouvette et la solution de stockage). De plus, une partie des alcalins est liée aux CSH et n'est donc pas soumise à la lixiviation (*Chen & Brouwers 2010*). En l'absence de dosage précis, il apparaît donc délicat de conclure précisément sur la teneur en alcalins de ces matériaux. En tout état de cause, la concentration en alcalins de la solution de stockage est supérieure à la teneur initiale du béton R2 et conduit donc à son enrichissement en Na_2O_{eq} .

Les corps d'épreuve présentent rapidement une fissuration importante (ouvertures de l'ordre du millimètre) très localisée comme l'atteste la Figure 3-22. Cette fissuration peut être expliquée par le développement de gonflements de RAG en surface empêchés par le cœur de l'éprouvette qui n'a pas encore débuté son expansion, le front d'alcalins n'ayant pas encore pénétré suffisamment en profondeur.

Le potentiel de gonflement de la formule R2 conservé en solution alcaline est évalué à 1,05 % (cf. Tableau 3-10). Cette valeur semble cohérente avec la modélisation proposée. De plus, les ordres de grandeur des gonflements mesurés sont cohérents avec ceux déterminés par (*Thomas et al. 2008*) avec une technique expérimentale semblable mise en œuvre pour des carottes de béton extraites d'ouvrages *in situ*. Néanmoins, malgré la technique de conservation spécifique mise en œuvre pour nos corps d'épreuve, cette valeur semble relativement importante pour une RAG : si on considère une pénétration du front d'imbibition plus rapide que celle des alcalins, il pourrait être envisageable que des gonflements de RSI se développent en profondeur en début d'essai (en parallèle de gonflements de RAG en surface), biaisant ainsi la détermination du potentiel de RAG de ce matériau. De plus, il est possible que la concentration en alcalins de la solution de stockage soit insuffisante pour empêcher entièrement la RSI. En tout état de cause, si cette technique expérimentale présente l'intérêt de supprimer ou de diminuer les gonflements de RSI, elle conduit à l'évaluation d'un potentiel de RAG bien supérieur à celui qu'un matériau pourrait développer dans des conditions plus classiques.



Figure 3-22 : fissuration des éprouvettes R2_GLA après 130 jours d'exposition

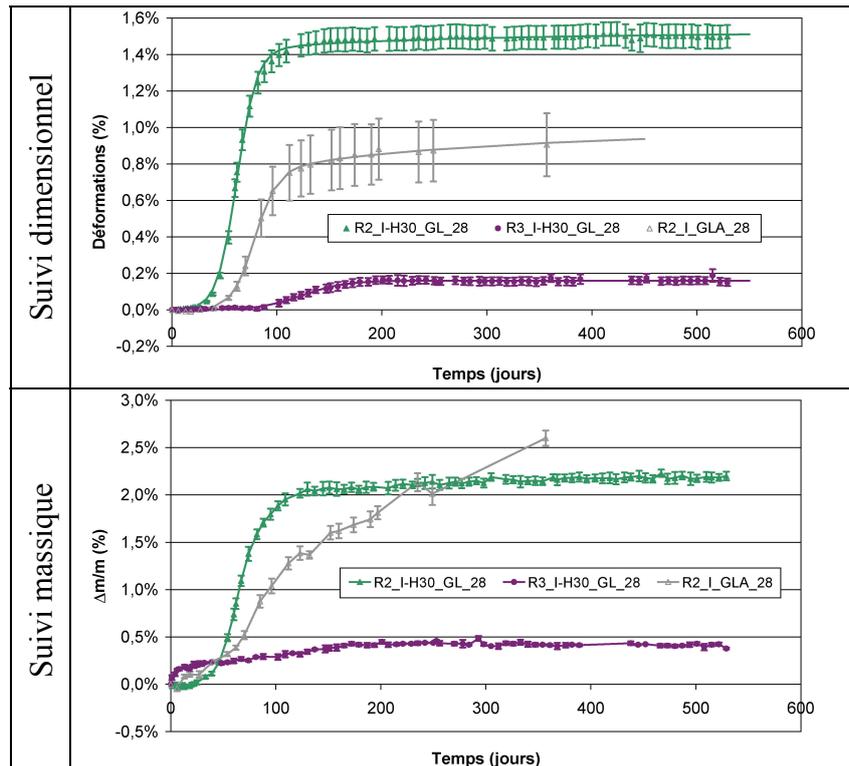


Figure 3-23 : comparaison des suivis dimensionnels et massiques des éprouvettes R2_I-H30_GL_28, R3_I-H30_GL_28 et R2_I_GLA_28

La détermination du potentiel de RAG d'un matériau susceptible de RSI et de RAG apparaît donc très compliquée de par les couplages physico-chimiques existant entre ces deux pathologies. Si certaines conditions expérimentales de laboratoire semblent pouvoir permettre de dissocier les effets des deux réactions, elles conduisent néanmoins au développement de processus délétères nettement plus marqués que ceux observés *in situ*. Ainsi, des investigations plus complètes seraient nécessaires pour obtenir une évaluation plus précise des amplitudes de RSI et de RAG (avec notamment la mise en œuvre d'observations microscopiques). Des observations du matériau sur une coupe transversale d'un cylindre au Microscope Electronique à Balayage (MEB) apporteraient des éléments de réflexion sur ce point. Néanmoins, l'interprétation de ces images n'en serait pas moins délicate : l'ettringite ayant précipité avant que le front d'alcalins n'atteigne le cœur de l'éprouvette pourrait être redissoute lors de l'augmentation du pH interne du matériau une fois que le cœur de l'éprouvette atteint par le front d'alcalins (*Brown & Bothe 1993*), effaçant ainsi toute trace d'une potentielle RSI. De telles investigations n'ont pu être menées dans le cadre de ces travaux.

En tout état de cause, la modélisation proposée pour la représentation du comportement expansif dans le cas d'une concomitance des deux pathologies semble mathématiquement bien adaptée aux conditions expérimentales que nous avons considérées. Toutefois, la phase 3 du mécanisme proposé en section 4.2.2 semble simplificatrice en considérant que les expansions mesurées à cet instant sont liées uniquement à une RAG : il apparaît plus probable qu'une formation simultanée d'ettringite et de gel de RAG soit responsable des expansions.

4.2.4.1.2 Comportements hydriques

La Figure 3-24 compare les évolutions de déformation en fonction des variations de masse des éprouvettes R2_I-H30_GL_28, R3_I-H30_GL_28 et R2_I_GLA_28. On observe des comportements hydriques similaires pour les corps d'épreuve fabriqués avec la formule R2, quel que soit leur mode de conservation, comme en attestent les résultats des régressions linéaires donnés par le Tableau 3-11. En revanche, le comportement hydrique de la formule R3 semble légèrement différent (modification de la pente de la droite de régression linéaire). Cette différence peut trouver son origine dans la modification de la microstructure du matériau R2 par rapport au matériau R3 de composition strictement identique mais dont l'histoire thermique au jeune âge est fondamentalement différente. Une porosité moins grossière dans le cas du matériau non traité thermiquement pourrait conduire à développer des pressions plus importantes lors de l'imbibition

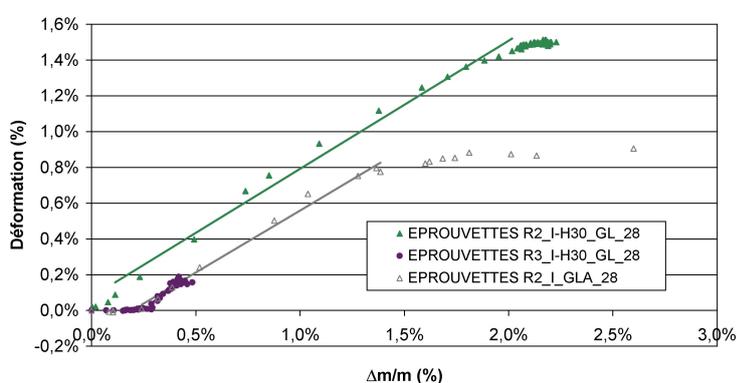


Figure 3-24 : évolution des déformations en fonction de la prise de masse – éprouvettes R2_I-H30_GL_28, R2_I-H30_GL_28 et R2_I_GLA_28

Tableau 3-11 : régression linéaire entre déformation et variations de masse – éprouvettes R2_I-H30_GL_28, R2_I-H30_GL_28 et R2_I_GLA_28

	Pente	Ordonnée à l'origine	Coefficient de corrélation
R2_I-H30_GL_28	0,716	0,076%	0,9936
R3_I-H30_GL_28	0,859	-0,206%	0,9768
R2_I_GLA_28	0,693	-0,134%	0,9944

4.2.4.2 Caractérisation de la lixiviation en phase de stockage

Un grand nombre d'interprétations des présents travaux mettent en cause le rôle des alcalins vis-à-vis des gonflements observés : la diminution de leur concentration peut faciliter la désorption des sulfates adsorbés sur les CSH et ainsi favoriser la précipitation d'ettringite (*Brown & Bothe 1993*) d'une part, mais leur présence en quantité substantielle dans le matériau peut également favoriser la formation de gels de RAG d'autre part.

La Figure 3-25 représente les suivis dimensionnels et massiques des éprouvettes de caractérisation de la lixiviation. Les traits verticaux représentent les échéances de prélèvement et de dosage pour chaque cas, en fin de phase de latence puis en phase de gonflements stabilisés. On observe que les cinétiques et les amplitudes de déformation de ces corps d'épreuve moulés et soumis à des conditions de gonflement libre sont différentes de celles évaluées pour des corps d'épreuve carottés (cf. sections 3.1, 3.2, 4.1 et 4.2). Ce point sera traité plus spécifiquement en section 9 de ce chapitre.

Le suivi de la teneur en alcalins au sein des matériaux en fonction du mode de conservation (obtenu par dosage des espèces présentes au cœur de l'éprouvette) semble être en accord avec les hypothèses que nous avons formulées sur les cinétiques et les amplitudes de lixiviation : à la fin de la première phase du mécanisme de gonflement (après environ 50 jours), la teneur en alcalins des matériaux a chuté de plus de 50 % pour les matériaux immergés contre une baisse inférieure à 20 % pour les matériaux conservés à 100 % HR (les teneurs initiales en alcalins ont été évaluées à environ 0,8 % et 0,9 % de la masse de ciment respectivement pour les formules R1 et R2). Ceci tend à confirmer que la lixiviation des alcalins est bien plus importante en eau qu'en atmosphère saturée. Cette tendance est confirmée après environ 300 jours d'exposition. Toutefois, on note une diminution substantielle de la teneur en alcalins pour les matériaux conservés à 100 % HR. On notera par ailleurs que la présence de Na et de K semble avoir plus diminué pour le béton R1 que pour le béton R2 ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = 0,23$ % de la masse de ciment à 265 jours pour R1 contre 0,50 % à 314 jours pour R2). Le dernier dosage en alcalins réalisé en « fin » de réaction permettra de compléter ces premières conclusions relatives aux cinétiques et aux amplitudes de lixiviation.

Le suivi dimensionnel du corps d'épreuve R2_H100_38_L_4 n'indique pas un comportement similaire à celui déterminé pour les éprouvettes R2_H100-H30_GL_28, bien que leurs compositions soient identiques et que leur mode de fabrication ait conduit au gâchage de matériaux similaires : en particulier, la phase 3 du mécanisme proposé en section 4.2.2 n'est pas reproduite (poursuite des expansions des éprouvettes H100 lorsque les gonflements se stabilisent pour les éprouvettes immergées). La caractérisation des traitements thermiques de ces différents corps d'épreuve a montré qu'aucune différence notable n'a pu être mise en évidence sur ce plan (cf. Chapitre 2). Par ailleurs, les différents matériaux ont tous fait l'objet d'une cure sous scellement aluminium à température ambiante jusqu'à un âge de 28 jours, échéance à laquelle les suivis hydrique et dimensionnel ont été initiés. De plus, les modes de conservation pour ces différentes éprouvettes ont été identiques : en particulier, le même réacteur à 100 % HR a été utilisé pour la conservation de ces corps d'épreuve. Une des différences notables entre ces corps d'épreuve réside dans leur mode de préparation : les premiers sont obtenus par carottage tandis que les seconds sont moulés lors du coulage. Les carottes présentent donc une répartition granulaire homogène par opposition aux cylindres moulés dont la surface est moins riche en gros granulats (effet de paroi [*Sedran & de Larrard 1994*]). Ceci a probablement une influence sur le développement d'une RAG éventuelle, les gonflements étant pilotés dans ces conditions par les plus gros granulats (*Larive 1998*). De plus, le procédé de carottage pourrait induire une microfissuration de surface responsable d'un affaiblissement local du matériau : ceci pourrait conduire le matériau à moins bien résister aux sollicitations mécaniques liées à la formation de produits de gonflement et donc conduire à l'apparition des expansions mesurées lors de la phase 3 du mécanisme de la section 4.2.2. Par ailleurs, si on suppose une lixiviation moins importante pour R2_H100-H30_GL_28 que pour R2_H100_38_L4 (même si des précautions ont été prises pour éviter ce phénomène), il est possible que la diminution substantielle de teneur en alcalins de cette dernière conduise à l'absence de formation de gels de RAG à l'issue de la phase 2 du mécanisme.

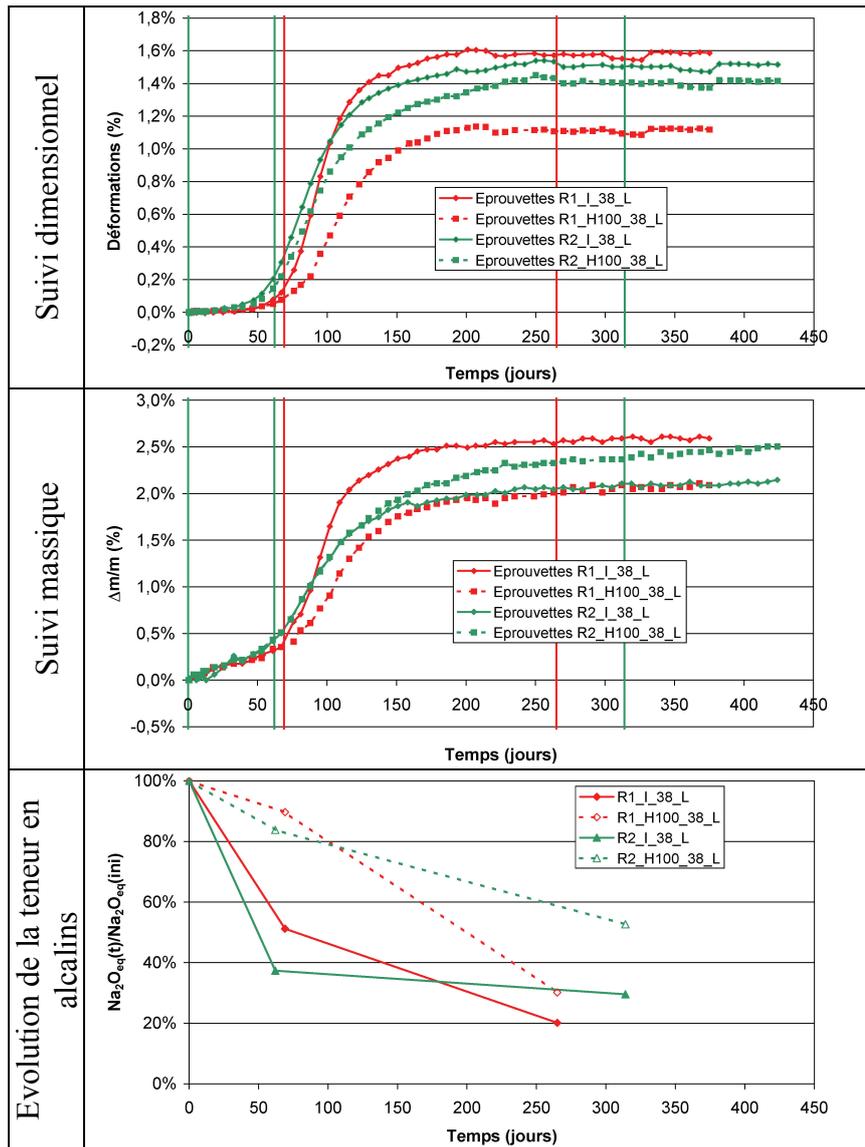


Figure 3-25 : comparaison des suivis dimensionnels et massiques et confrontation à la teneur en alcalins – formules R1 et R2 – conservation en eau et à 100 % HR

Ces résultats nous incitent à conclure sur la nécessité de maîtriser au mieux les différents paramètres expérimentaux dans le cadre de travaux sur les RGI. Il apparaît primordial de préciser systématiquement de manière exhaustive l'ensemble des paramètres liés à une étude afin de mieux comprendre les causes possibles du développement d'expansions.

Par ailleurs, même si les résultats de suivis dimensionnels divergent entre les essais de caractérisation de la lixiviation et les essais de gonflement libre de cette étude, les premiers peuvent néanmoins être considérés pour valider les hypothèses formulées sur la lixiviation des alcalins dans le mécanisme présenté en section 4.2.2.

4.2.4.3 Caractérisation microscopique des matériaux

En parallèle des dosages en alcalins contenus dans les matériaux, une caractérisation de la microstructure par microscopie électronique à balayage a été effectuée à des échéances identiques (chaque cylindre prélevé est séparé en deux parties par fendage,

une partie servant aux analyses chimiques, la seconde servant aux observations – cf. Chapitre 2). Les méthodes de microscopie mises en œuvre sont identiques à celles décrites dans le Chapitre 2.

La première échéance d'observation a révélé la quasi-absence d'ettringite au sein des différents bétons à 28 jours d'âge (i.e. après cure thermique et cure sous aluminium étanche à température ambiante). On note toutefois des traces d'ettringite dans les zones les plus poreuses (cf. Figure 3-27.a et b). D'une manière générale et pour les deux bétons, la pâte de ciment semble saine et microporeuse (cf. Figure 3-27.c). De plus, on remarque des quantités relativement importantes de phases anhydres (cf. Figure 3-27.d). Les interfaces pâte - granulats sont néanmoins cohésives (cf. Figure 3-27.e). On note par ailleurs pour le matériau R2 la présence de gel d'alcali-réaction (cf. Figure 3-27.f), sous forme relativement ponctuelle (présence de gel non généralisée à l'ensemble des granulats réactifs), à l'image des observations réalisées lors de la mise au point des formules de béton en Chapitre 2.

(Ulm *et al.* 2000) et (Li *et al.* 2004) suggèrent une dépendance du temps caractéristique τ_C et du temps de latence τ_L à la température suivant la relation (3-9) :

$$\tau_{C,L}(T) = \tau_{C,L}(T_0) \cdot \exp \left[U_{C,L} \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (3-9)$$

Les valeurs proposées par ces auteurs dans le cas de la RAG sont 5400 ± 500 K et 9400 ± 500 K pour U_C et U_L respectivement (cf. relation (3-9)). Selon (Larive 1998), la température n'a que peu d'influence sur l'amplitude des expansions. Ainsi, au cours du traitement thermique, les paramètres cinétiques des gonflements de R2 évoluent. Par intégration de la dérivée de l'expression des gonflements au cours du temps, il est possible de calculer le gonflement du matériau en fonction de son histoire thermique. La dérivée temporelle de la relation (3-1) est donnée par la relation (3-10). Les paramètres cinétiques de la formule R3 (température de référence de l'essai de 38°C) sont donnés dans le Tableau 3-10.

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \varepsilon_\infty \cdot \frac{\left(e^{\frac{t}{\tau_C}} + 1 \right) \cdot e^{\frac{t}{\tau_C}}}{\tau_C \cdot \left(e^{\frac{t}{\tau_C}} + e^{\frac{\tau_L}{\tau_C}} \right)^2} \quad (3-10)$$

La Figure 3-26 représente les résultats correspondant à l'application de la loi de (Ulm *et al.* 2000) pour la formule R2 durant la cure thermique. On observe que le gonflement estimé en fin de cure est de l'ordre de 0,08 %. Si ce dernier n'est pas négligeable, l'amplitude modérée qu'on évalue semble cohérente avec une présence modérée de gel d'alcali-réaction.

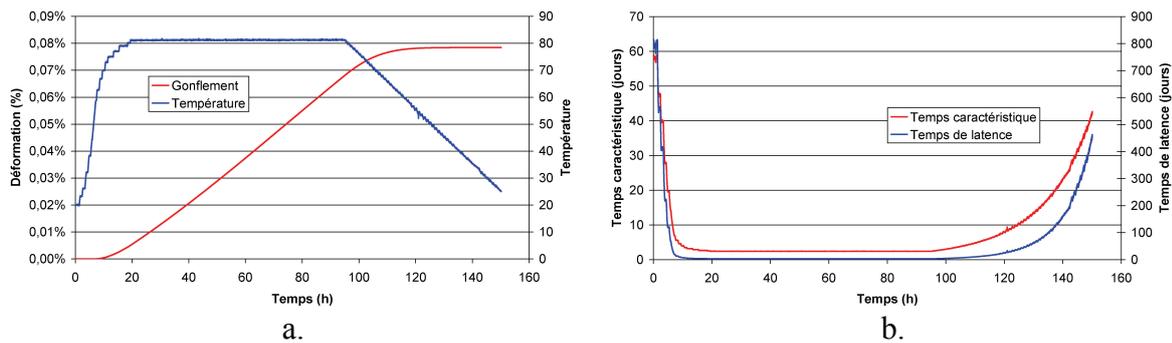


Figure 3-26 : expansion développée par la formule R2 durant la cure thermique suivant la loi de coulage de (Ulm et al. 2000) (a. calcul du gonflement ; b. évolution des temps de latence et caractéristique)

Les observations à l'issue de la phase 1 du mécanisme (après environ 60 jours d'exposition) révèlent les premières traces de dégradation. A ce stade, les matériaux présentent une teneur en ettringite bien plus importante qu'initialement. L'ettringite se dépose massivement aux interfaces pâte – granulat (cf. Figure 3-28.a et b) tout comme au sein de la pâte de ciment, dans des vacuoles notamment (cf. Figure 3-28.c et d). Ce phénomène semble étendu à l'ensemble des échantillons. On note également la présence de CSH à deux niveaux de gris caractéristiques des bétons ayant subi une cure thermique puis conservés à température ambiante (cf. Figure 3-28.e) (Scrivener 1992, Famy et al. 2002-b). Certains granulats siliceux semblent altérés (cf. Figure 3-28.f) ce qui tend à confirmer les observations macroscopiques effectuées au moment de la préparation des échantillons. Par ailleurs, on observe la présence de gels d'alcali-réaction dans les échantillons R2 mais de manière plus ponctuelle (cf. Figure 3-28.g et h) (présence de gel non généralisée à l'ensemble des granulats réactifs).

A l'issue de la phase 2 du mécanisme de gonflement de la section 4.2.2, la présence d'ettringite semble encore plus marquée. A ce stade, la microstructure des matériaux est très largement altérée et présente une microfissuration importante (cf. Figure 3-29.a et b). Les interfaces pâte – granulat sont massivement remplies d'ettringite (cf. Figure 3-29.c), à l'image des fissures (cf. Figure 3-29.d et e). Par ailleurs, on peut détecter la présence de gels d'alcali-réaction au sein de certaines empreintes de granulat (cf. Figure 3-29.f). Ce phénomène semble toutefois nettement moins étendu que la présence d'ettringite massive.

La Figure 3-30 représente des prélèvements d'éprouvettes en fin de phase 3 du mécanisme (i.e. après développement des gonflements intenses) traités à l'acétate d'uranyle afin de révéler la présence de gels de RAG par fluorescence. Pour le cas de la formule R1, le test révèle la grande majorité du temps l'absence de gels de RAG. Néanmoins, la Figure 3-30.b montre que certaines zones de gels peuvent être détectées ponctuellement. De telles formations de produits de RAG peuvent indiquer que certains granulats considérés comme non réactifs à « température ambiante » peuvent se révéler susceptibles de RAG pour des températures élevées. Il convient néanmoins de noter que de telles formations de gels pour le béton R1 se sont révélées très rares. Il semble donc peu probable que la présence de ces gels soit le fruit d'une exacerbation d'un caractère général de RAG latent des Gravillon_NR. En outre, les suivis dimensionnels de bétons non traités thermiquement incluant ces granulats confirment l'absence d'expansion dans notre cadre expérimental.

Le cas du béton R2 est beaucoup plus caractéristique d'un matériau atteint de RAG. La Figure 3-30.d montre l'omniprésence de gel de RAG dans le matériau, que ce soit au contact des granulats ou dans la matrice. Des essais de fluorescence similaires à l'issue de

la phase 4 apporteront des éléments de réponse quant à une éventuelle poursuite de la formation de gel de RAG. Ces premiers éléments semblent en tout état de cause ne pas remettre en question les hypothèses formulées dans le cadre du mécanisme présenté en section 4.2.2.

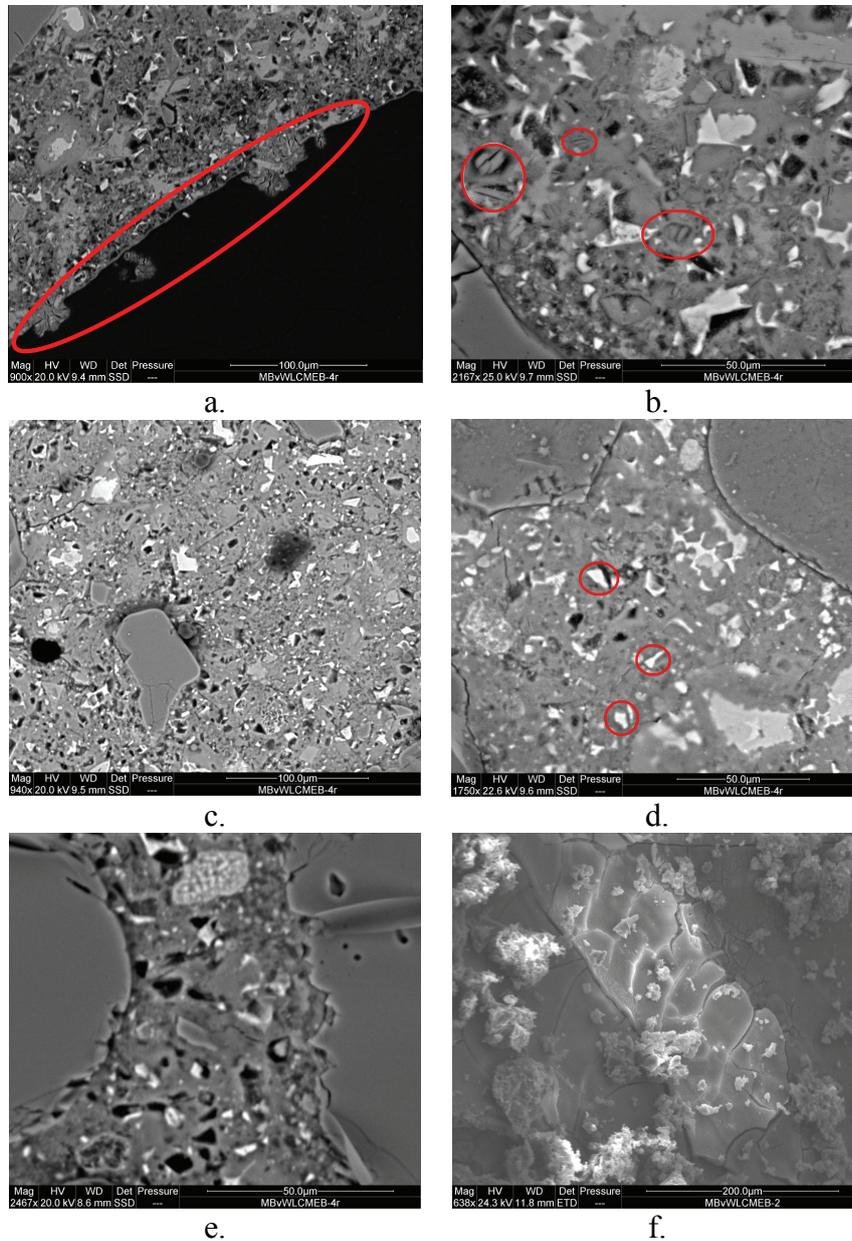


Figure 3-27 : observations microscopiques des matériaux avant exposition à l'humidité (28 jours)

a. R2_H100_38_L_1 : ettringite au bord d'une vacuole

b. R2_I_20_L_1 : nodules d'ettringite au sein de la matrice cimentaire

c. R1_H100_38_L_1 : microporosité au sein de la matrice cimentaire

d. R1_H100_38_L_1 : présence de phases anhydres

e. R1_I_38_L_1 : interface pâte – granulat

f. R2_I_20_L_1 : gel d'alcali-réaction

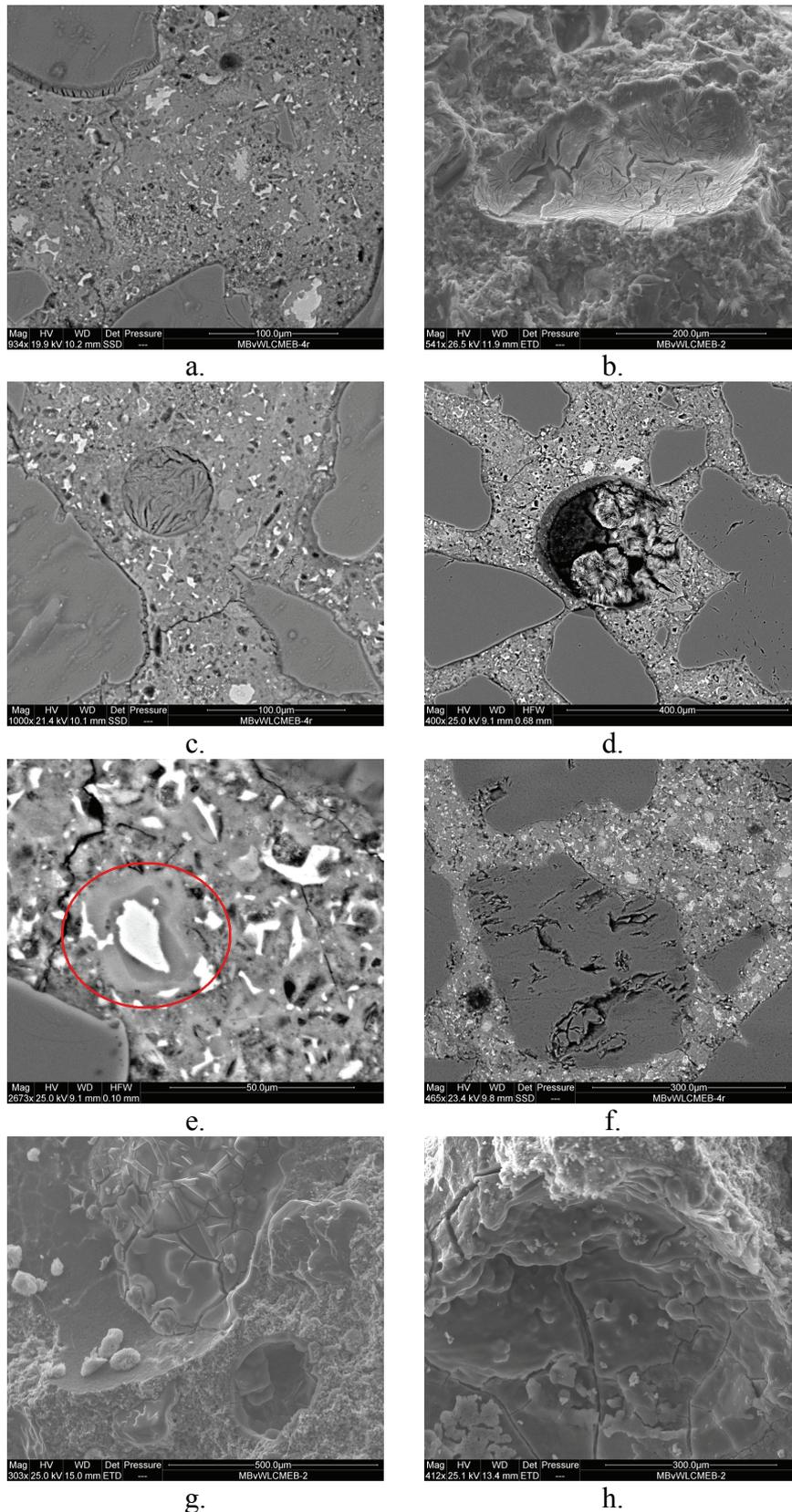


Figure 3-28 : observations microscopiques des matériaux à l'issue de la phase 1 du mécanisme (~ 60 j)

a. R2_H100_38_L_2 : présence d'ettringite aux interfaces pâte - granulat

c. R2_H100_38_L_2 : présence d'ettringite au sein de vacuoles

e. R2_H100_38_L_2 : CSH à deux niveaux de gris

g. R2_I_38_L_2 : présence de gel d'alcali-réaction au sein d'une empreinte de granulat

b. R2_H100_38_L_2 : présence d'ettringite massive au sein d'une empreinte de granulat

d. R1_H100_38_L_2 : vacuole partiellement remplie d'aiguilles d'ettringite

f. R2_I_38_L_2 : altération d'un grain de sable siliceux

h. R2_I_38_L_2 : vacuole remplie de gel d'alcali-réaction

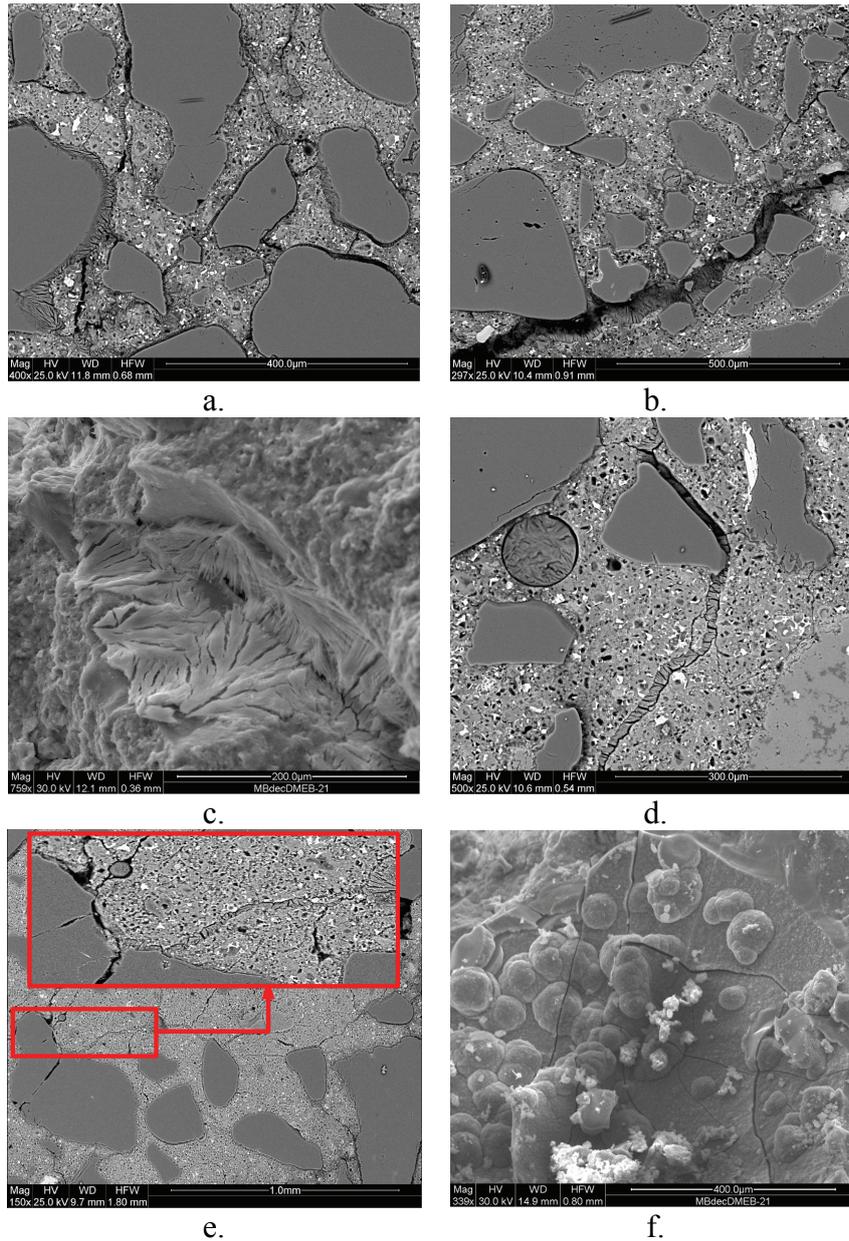


Figure 3-29 : observations microscopiques des matériaux à l'issue de la phase 2 du mécanisme (~ 300 j)

- a. R1_I_38_L_3 : ettringite massive aux interfaces pâte – granulat et des fissures
- b. R1_H100_38_L_3 : formation de grosses fissures avec amas d'ettringite
- c. R2_I_38_L_3 : ettringite massive au sein d'une empreinte de granulat
- d. R2_H100_38_L_3 : vacuole et fissure remplies d'ettringite
- e. R2_I_38_L_3 : dégradation générale du matériau et remplissage des fissures
- f. R2_I_38_L_3 : gel d'alcali-réaction

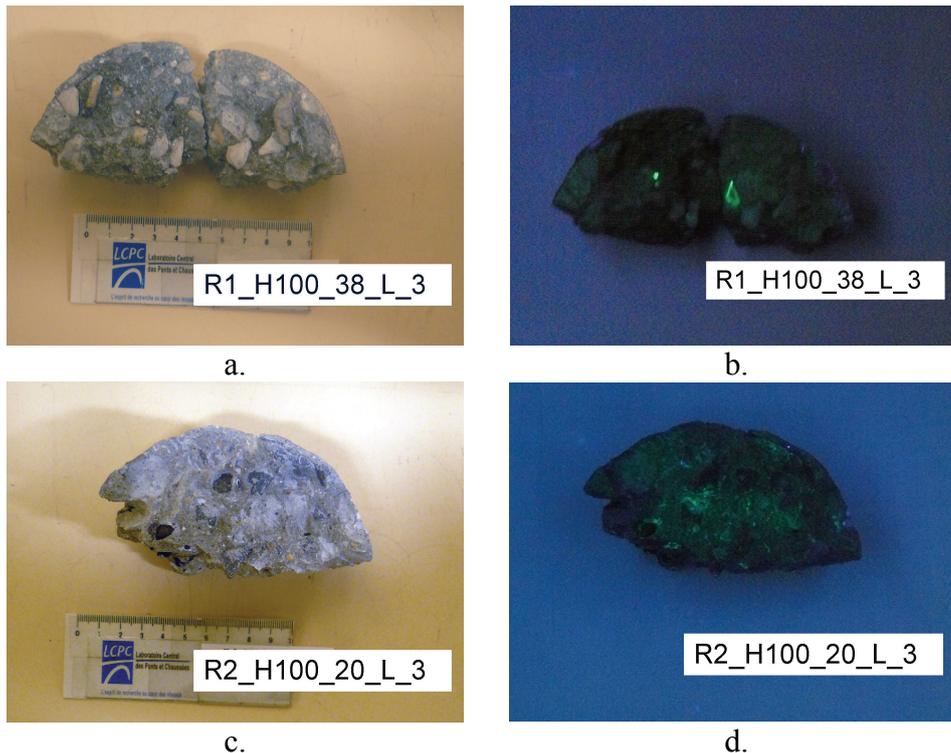


Figure 3-30 : détection de la présence de gels silico-alkalins par fluorescence des ions uranyles
 a. R1_H100_38_L_3 – lumière naturelle
 b. R1_H100_38_L_3 – fluorescence
 c. R2_H100_20_L_3 – lumière naturelle
 d. R2_H100_20_L_3 – fluorescence

Au total, ces caractérisations microscopiques semblent globalement en accord avec les hypothèses que nous avons formulées vis-à-vis des cinématiques de RAG et de RSI : avant l'exposition des matériaux à l'humidité, seules quelques traces d'ettringite sont présentes. On note également la présence ponctuelle de gels de RAG. Même si les gels ne sont pas massivement présents, ces observations sont cohérentes avec une initialisation de la RAG durant la cure thermique par thermoactivation.

A l'issue de la phase 1 (déformation macroscopique de l'ordre de 0,1-0,2 %), on note toujours la présence de gel de RAG ponctuellement. L'ettringite en revanche a commencé à précipiter massivement, notamment aux interfaces pâte – granulat (néanmoins, nous ne préjugeons ici d'aucun mécanisme de gonflement). Ceci semble concorder avec le développement d'une RSI.

Enfin, à l'issue de la phase 2, la concentration en gel de RAG ne semble pas avoir augmenté de manière considérable. En revanche, l'ettringite est omniprésente et le matériau est sévèrement dégradé (présence d'interstices aux interfaces pâte – granulat et de fissures dans la matrice).

Ainsi, ces observations ne semblent pas en contradiction avec les hypothèses que nous avons formulées dans le cadre du mécanisme de gonflement de la section 4.2.2. Les observations microscopiques finales non encore disponibles lors de la réaction de ce mémoire) permettront de disposer d'éléments complémentaires pour appuyer ou non ces premières conclusions.

4.3 Eprouvettes non soumises à un apport d'eau

La Figure 3-31 représente les suivis dimensionnels et massiques des échantillons de gonflement libre R2 conservés sous scellement aluminium et en séchage à 30 % HR. Comme pour les échantillons R1, on mesure un retrait de dessiccation de -0,3 % dans le cas des échantillons scellés (perte de masse associée de -0,8 %) et de -0,8 % pour les échantillons soumis à un séchage à 30 % HR (perte de masse associée de -4 %).

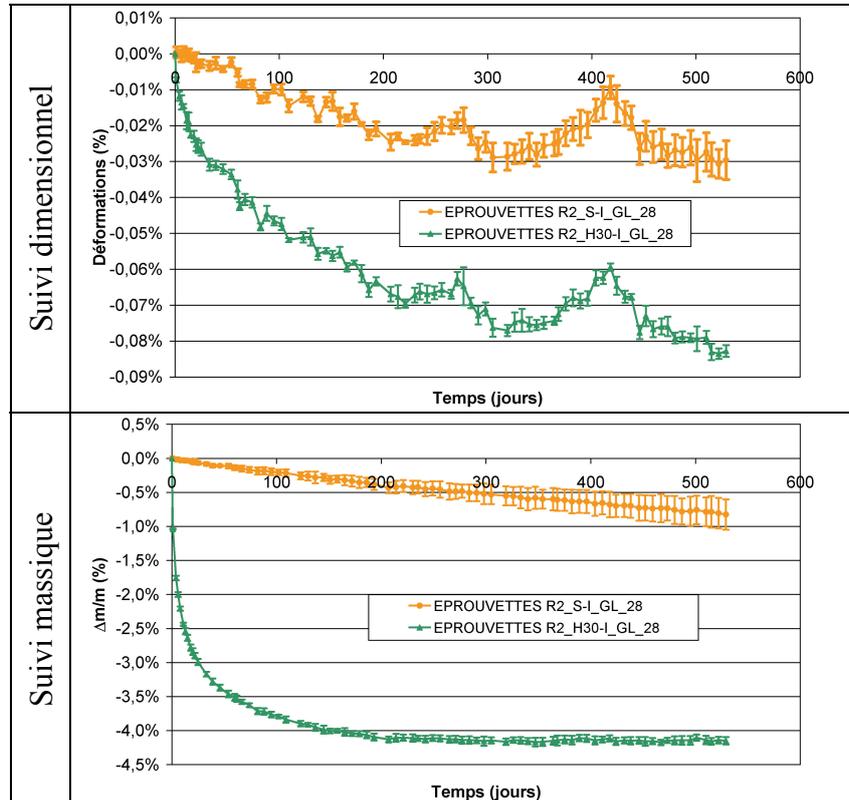


Figure 3-31 : suivis dimensionnels et massique des échantillons R2 – conservation sous scellement et à 30 % HR

À l'image des corps d'épreuve uniquement susceptibles de RSI, l'absence de gonflement des échantillons séchés est attribuée à la progression très rapide du front de séchage jusqu'au cœur de l'échantillon. La Figure 3-32 représente graphiquement l'évaluation des profils de séchage à différents instants au sein des échantillons R1 et R2 selon l'approche présentée en section 3.2. On observe des comportements hydriques en séchage tout à fait comparables : le cœur du corps d'épreuve est rapidement touché par le séchage, bloquant ainsi le développement des gonflements potentiels.

Les échantillons conservés sous scellement subissent un séchage imputable aux défauts d'étanchéité de la protection hydrique au droit des zones instrumentées, à l'instar des phénomènes observés pour les échantillons R1. L'évaluation des profils de séchage suivant la méthodologie présentée en section 3.3 montre des comportements hydriques similaires tout au long des expérimentations (cf. Figure 3-33). De même que pour le béton R1, le maintien d'une humidité élevée au cœur du matériau laisse penser que les gonflements ne sont pas nécessairement bloqués dans ce cas de figure mais pourraient être fortement retardés par la lenteur de la désorption des sulfates (*Divet & Randriambololona 1998*) en l'absence de diminution du pH sous l'effet de la lixiviation des alcalins (*Brown &*

Bothe 1993) et en l'absence de mouvements d'eau liquide. Comme pour le béton R1, un suivi à long terme du matériau en gonflement libre sans apport hydrique pourrait permettre de fournir des éléments de réponses.

Il est à noter que dans ces conditions d'exposition, (Multon 2004) a mis en évidence le développement de gonflements de RAG. Le calcul mené en section 4.2.4.3 estime que le gonflement de RAG développé durant la cure thermique est de l'ordre de 0,08 %. Le potentiel de gonflement du matériau R3 a été estimé à 0,16 %. Ainsi, à l'issue de la cure, seule la moitié du potentiel d'expansion de R2 a été consommée. L'absence d'expansions dans le cadre de nos essais confirme ainsi la modification du comportement de RAG suite à l'application de la cure thermique.

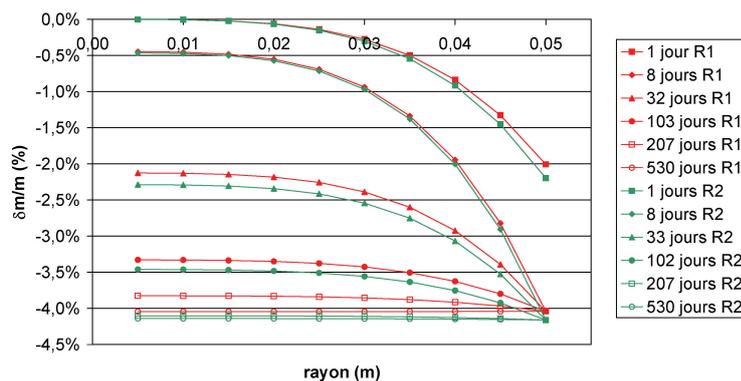


Figure 3-32 : comparaison des profils de séchage des éprouvettes R1 et R2 conservées à 30 % HR

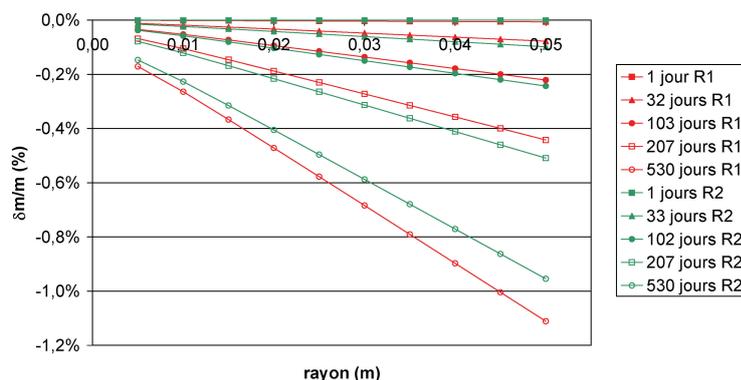


Figure 3-33 : comparaison des profils de séchage des éprouvettes R1 et R2 conservées sous scellement

4.4 Influence de la température de conservation

4.4.1 Suivis des corps d'épreuve et lixiviation des alcalins

Les essais de gonflement libre prévus dans le programme expérimental sont axés principalement sur l'évaluation du couplage existant entre humidité et gonflements. Lorsqu'une seule Réaction de Gonflement Interne (RGI) est susceptible de toucher un matériau, la température de stockage des corps d'épreuve a pour effet, a priori, de modifier les cinétiques et les amplitudes de gonflement (Pavoine 2003, Baghdadi 2008). En revanche, lorsque deux RGI sont susceptibles d'être couplées, la température de stockage peut favoriser une réaction par rapport à une autre et donc modifier les interactions entre les pathologies. Une diminution de la température de stockage semble être favorable à un développement de RSI plus intense, et à un retard de développement de la RAG (jusqu'à un certain point en dessous duquel des risques de formation de thaumasite sont à craindre

et poseraient d'autres problèmes [Mingyu *et al.* 2006]), en diminuant notamment 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-b) 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.

La Figure 3-34 compare les évolutions dimensionnelles et massiques d'éprouvettes R2 conservées à 38°C ou à 20°C, en eau ou à 100 % HR. D'une manière générale, on observe que l'effet de la température de stockage sur le temps de latence mis en évidence par (Baghdadi *et al.* 2008-b) est retrouvé : les gonflements sont initiés plus tardivement pour les éprouvettes conservées à 20°C que pour celles conservées à 38°C. On remarque également que les cinétiques de gonflement sont plus rapides en eau qu'à 100 % HR à une température de stockage de 38°C et inversement à 20°C. En outre, si, à 20°C, l'amplitude de gonflement du matériau conservé à 100 % HR est également plus importante que dans le cas d'une immersion, on n'observe pas de poursuite des gonflements inattendue à la fin de la première phase de gonflement intense.

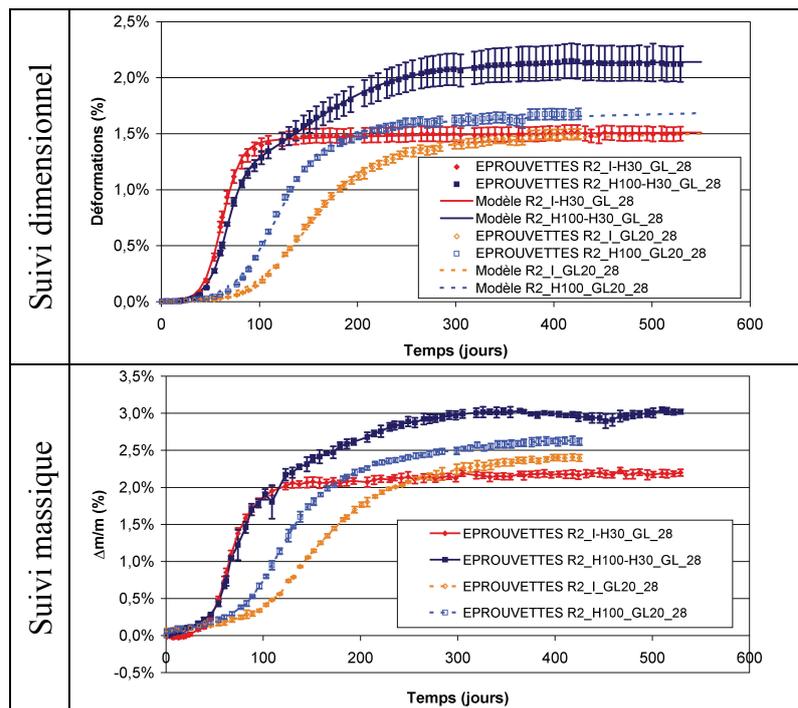


Figure 3-34 : suivis dimensionnels et massiques des éprouvettes R2 – conservation en eau et à 100 % HR – température de stockage de 20°C et 38°C

Tableau 3-12 : comparaison des paramètres de modélisation des gonflement libre des éprouvettes R2 – conservation en eau et à 100 % HR – température de stockage 20°C et 38°C

	R2_I-H30_GL_28	R2_I_GL20_28	R2_H100-H30_GL_28	R2_H100_GL20_28
ϵ_{∞} RSI	1,55%	1,65%	1,24%	1,81%
τ_C RSI (jours)	9	30	9	22
τ_L RSI (jours)	62	147	66	117
ϕ (jours)	15	64	26	50
δ (jours)	120	146	119	153
ϵ_{∞} RAG	-	-	0,95%	-
τ_C RAG (jours)	-	-	45	-
τ_L RAG (jours)	-	-	149	-

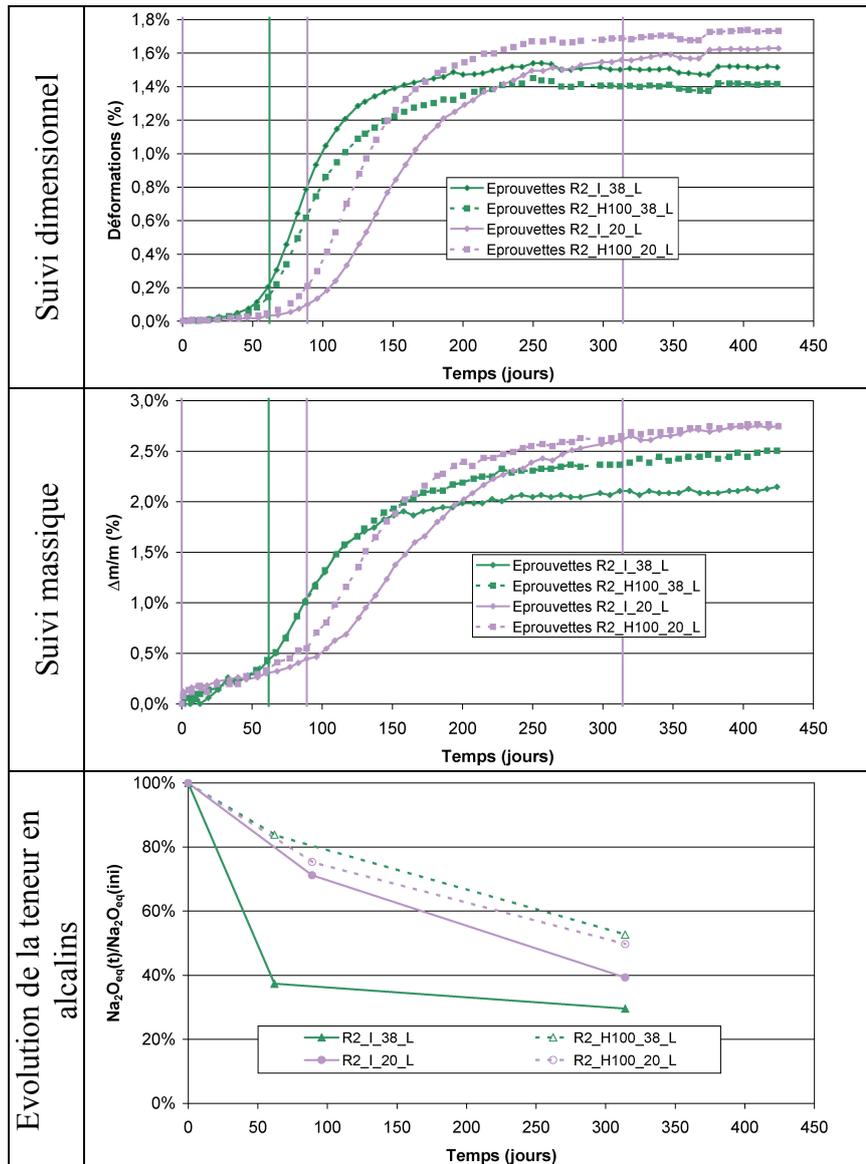


Figure 3-35 : comparaison des suivis dimensionnels et massiques et confrontation à la teneur en alcalins – formule R2– conservation en eau et à 100 % HR – température de conservation de 20°C et 38°C

Cette « inversion » des cinétiques en fonction de la température et du mode de conservation semble assez complexe à expliquer à la lumière de ces données. La Figure

3-35 représente les résultats des essais de caractérisation de la lixiviation en phase de stockage disponibles au moment de la rédaction du présent mémoire. Il semble que, dans le cas d'une immersion, la lixiviation des alcalins soit assez nettement moins importante à 20°C qu'à 38°C en début de suivi. Après 300 jours d'exposition, les teneurs en alcalins semblent assez similaires. Dans le cas d'une conservation à 100 % HR, les comportements du matériau vis-à-vis de la lixiviation semblent relativement comparables.

Une teneur en alcalins plus importante semble a priori plus favorable au développement d'une RAG. En revanche, une baisse de la température de stockage est a priori favorable à la RSI. A 20°C, les évolutions dimensionnelles plus rapides à 100 % HR pourrait donc correspondre au développement d'une RAG. Néanmoins, étant donné la température de conservation et les amplitudes d'expansion, cette hypothèse n'apparaît que peu probable. De plus, les observations MEB réalisées sur les échantillons correspondants ne semblent pas concorder avec cette hypothèse : si des gels de RAG sont effectivement détectés, leur présence semble néanmoins très localisée et pourrait être le fruit de la thermoactivation de cette pathologie en phase de cure thermique.

Ainsi, ces différences de cinétiques semblent relativement complexes à expliquer à la lumière de ces données. Des investigations complémentaires seraient nécessaires à la compréhension détaillée de ces phénomènes. De tels travaux n'ont pu être menés dans le cadre de ce programme expérimental.

4.4.2 Comportement hydrique

La Figure 3-36 et la Figure 3-37 représentent l'évolution des déformations en fonction des variations relatives de masse des corps d'épreuve. Quelle que soit la température de stockage, on observe des comportements hydriques similaires, comme cela est confirmé par la régression linéaire (cf. Tableau 3-13) : les pentes de régression sont comparables dans tous les cas.

Tableau 3-13 : régression linéaire entre déformation et variations de masse – éprouvettes R2 – conservation en eau et à 100 % HR – température de conservation de 20°C et 38°C

	Pente	Ordonnée à l'origine	Coefficient de corrélation
R2_I-H30_GL_28	0,716	0,076%	0,9936
R2_I_GL20_28	0,695	-0,088%	0,9988
R2_H100-H30_GL_28	0,694	-0,014%	0,9977
R2_H100_GL20_28	0,701	-0,061%	0,9979

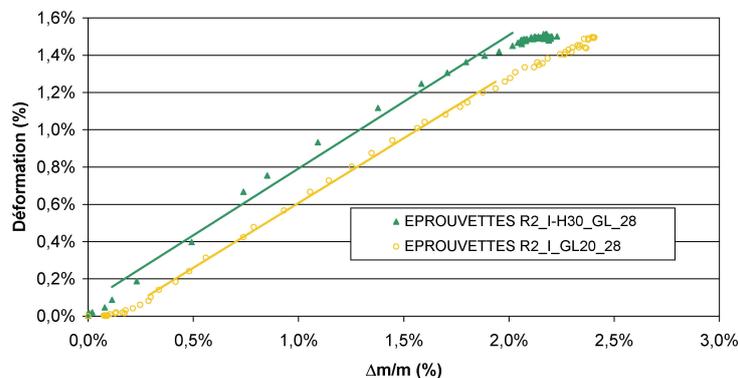


Figure 3-36 : évolution des déformations en fonction de la prise de masse – éprouvettes R2 – conservation en eau – températures de stockage de 20°C et 38°C

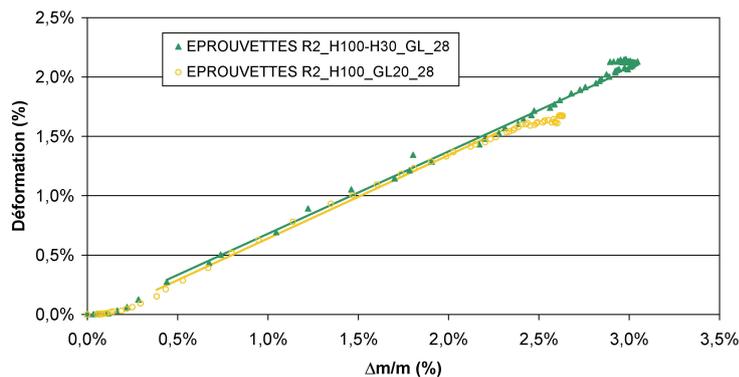


Figure 3-37 : évolution des déformations en fonction de la prise de masse – éprouvettes R2 – conservation à 100 % HR – températures de stockage de 20°C et 38°C

4.5 Conclusions

Afin de mieux comprendre les phénomènes de couplage entre RSI et RAG (réactions souvent observées de manière simultanée *in situ*), des essais de gonflement libre à 38°C ont été mis en œuvre pour différentes conditions d'exposition à l'humidité. Les cinétiques ont été quantifiées à l'aide de modèles de gonflement libre (*Larive 1998, Brunetaud 2005*). Dans ce cadre, on s'est efforcé « par défaut » de décrire les expansions par une courbe unique issue des modèles existants. Cette méthode ne s'est pas révélée systématiquement pertinente et a incité à considérer la superposition de RSI et de RAG dans le cas de corps d'épreuve conservés en atmosphère saturée.

Le cas des éprouvettes immergées mène aux mêmes conclusions que pour un matériau uniquement atteint de RSI (gonflements d'autant plus rapides que l'humidité environnante est élevée). Néanmoins, on observe une initiation et une cinétique de gonflements plus rapides dans le cas de la formule atteinte de RSI et de RAG. Ainsi, la possibilité d'une initiation plus précoce de la RSI par la RAG pour une température de stockage de 38°C est évoquée. Certains travaux retranscrits dans la littérature fournissent des éléments permettant d'appuyer cette hypothèse, mettant notamment en cause la thermoactivation de la RAG durant la cure thermique (*Diamond & Ong 1994, Shayan & Ivanusec 1996, Ekolu et al. 2007-a*) : dans ce cas, une microfissuration et une consommation des alcalins du matériau pourraient activer la RSI.

Les éprouvettes conservées à 100 % HR ont mis en évidence un comportement singulier : à l'approche de la phase de palier des éprouvettes immergées, on assiste à une poursuite significative des gonflements des corps d'épreuve conservés en atmosphère saturée jusqu'à dépassement du potentiel de gonflement des éprouvettes immergées. Ce phénomène a été attribué à la formation de gels de RAG après développement de RSI, grâce à la plus faible lixiviation des alcalins dans ce cas. Des expérimentations complémentaires semblent confirmer cette différence de cinétique de lixiviation en fonction des conditions de conservation. Néanmoins, l'utilisation de corps d'épreuve moulés plutôt que carottés dans ces essais n'a pas permis de reproduire le comportement expansif singulier des éprouvettes R2_H100-H30_GL_28. Cette différence a été attribuée à une potentielle microfissuration lors du carottage des cylindres de gonflement libre et à une modification de la répartition des granulats par effet de paroi.

En outre, un modèle de gonflement libre permettant de décrire les gonflements observés dans cette étude sous une atmosphère de 100 % HR a été proposé : la RSI et la

RAG y sont considérées comme indépendantes (ce qui en termes physico-chimiques n'est probablement pas vrai) ; les expansions sont donc modélisées comme la somme d'un gonflement de RSI (*Brunetaud 2005*) et d'un gonflement de RAG (*Larive 1998*). Si cette hypothèse d'indépendance des réactions est probablement abusive, elle conduit néanmoins à une modélisation des gonflements libres qui est apparue plus pertinente que les modèles de la littérature associés à une réaction unique que nous avons testés.

Ce modèle conduit à l'évaluation d'un potentiel de RAG proche de 1 %. Cette amplitude d'expansion paraît considérable pour cette pathologie. En effet, l'évaluation du potentiel de RAG en l'absence de cure thermique conduit à évaluer une amplitude de l'ordre de 0,15 %. Cependant, une conservation en solution alcaline (KOH = 1 mol/L) évalue le potentiel à environ 1 %. Néanmoins, la possibilité de développement d'une RSI dans ce cas de figure n'a pu être entièrement écartée. D'autre part, de telles conditions expérimentales surévaluent clairement les effets délétères de la RAG. Ces investigations ont en tout état de cause mis en évidence la difficulté inhérente à la détermination des contributions délétères de la RSI et de la RAG dans le cas d'un couplage de ces deux pathologies.

Les éprouvettes non soumises à un apport d'eau extérieur mènent aux mêmes conclusions que celles formulées dans le cas d'un béton uniquement atteint de RSI : le front de séchage atteint rapidement le cœur des corps d'épreuve dans le cas des éprouvettes conservées à 30 % HR tandis que l'humidité au cœur des éprouvettes scellées semble encore très importante en fin de suivi. Cependant, aucun gonflement n'est observé indiquant ainsi que les gonflements pourraient être retardés et peut-être pas supprimés dans ce cas. Un suivi à long terme a été mis en œuvre pour apporter des éléments de réponse sur ce point.

Enfin, la température de stockage semblant avoir un effet déterminant sur les couplages entre RSI et RAG, des essais de gonflement libre ont été réalisés à une température de 20°C. Les résultats issus de ces essais semblent relativement délicats à expliquer : on observe une inversion relative des cinétiques de gonflement des corps d'épreuve immergés et conservés à 100 % HR lorsque l'on bascule la température de conservation de 38°C à 20°C. Des investigations plus poussées sont nécessaires pour éclaircir ce point.

Au total, les résultats sur le béton R2 ont mis en évidence le rôle déterminant des alcalins dans le cas d'une superposition RSI-RAG. Ainsi, la caractérisation de leur lixiviation peut apporter des éléments de compréhension déterminants quant aux couplages entre les deux pathologies et au développement des expansions de RSI et de RAG (*Wood et al. 1996, Famy et al. 2001*). La teneur en alcalins d'un matériau peut clairement affecter les cinétiques et amplitudes de gonflement des deux réactions et donc jouer sur leur couplage. Dans la mesure du possible, il apparaît donc souhaitable d'estimer la lixiviation des alcalins au cours du temps lors de la réalisation d'essais de gonflement libre en atmosphère humide (*Aubert et al. 2009, Wood 2010*).

Par ailleurs, il semble que dans certains cas (en particulier, cas des éprouvettes conservées en atmosphère saturée dans cette étude mais dont les conclusions correspondantes ne peuvent être généralisées en l'absence d'investigations complémentaires), la considération d'une cinétique sigmoïde unique ne permet pas de décrire de manière pertinente les expansions de bétons susceptibles de RSI et de RAG. La superposition d'une contribution de RSI et d'une autre de RAG a été suggérée et permet de simuler de manière satisfaisante les résultats expérimentaux. Néanmoins, la décomposition

mathématique correspondante n'est pas unique et ne permet donc pas de conclure de manière certaine quant à la « signification physico-chimique » du modèle.

5 Influence de la composition du ciment : cas d'un ciment CEM I PM ES

La formule de béton NR a été mise au point initialement pour ne pas développer de RSI malgré l'application d'une cure thermique. Elle est composée du squelette granulaire de la formule R1 et d'un ciment CEM I PM ES (ciment_NR) dont les teneurs en sulfates, aluminates et alcalins étaient supposées suffisamment faibles pour éviter le développement d'expansions (*Kretz et al. 2007*). La présente section décrit les essais de gonflement libre réalisés dans différentes conditions de conservation hydrique pour cette formule et montre les expansions que ce matériau a néanmoins développées suite à l'application de la cure thermique.

5.1 Éprouvettes soumises à un apport d'eau

La Figure 3-38 représente les suivis dimensionnels et massiques des éprouvettes NR_I-H30_GL_28 et NR_H100-H30_GL_28. Malgré l'utilisation d'un ciment CEM I PM ES, l'application de la cure thermique conduit au développement de gonflements conséquents. Comme pour les éprouvettes R1, les éprouvettes conservées en eau présentent une amplitude et une cinétique de gonflement plus rapides que les éprouvettes conservées à 100 % HR (cf. Tableau 3-14). De par la composition et le mode de fabrication des matériaux NR et R1, on suppose que la réaction pathogène est identique dans les deux cas (des observations microscopiques en fin de programme doivent permettre de confirmer ou non cette hypothèse). Dès lors, les interprétations du comportement expansif du béton NR sont identiques à celles proposées pour la formule R1 (cf. section 3.1). La composition du ciment_NR conduit à la formation d'une quantité d'ettringite moins importante (le ciment_NR contient notamment moins de sulfates et moins d'aluminates que le ciment_R), induisant ainsi des gonflements potentiellement moins importants (les expansions ne sont en effet pas uniquement fonction de la quantité d'ettringite formée).

Tableau 3-14 : calage des paramètres du modèle de gonflement libre – éprouvettes NR – conservation en eau et à 100 % HR

	NR_I-H30_GL_28	NR_H100-H30_GL_28
ε_{∞}	0,34%	0,19%
τ_C (jours)	29	48
τ_L (jours)	92	100
ϕ (jours)	54	30
δ (jours)	84	88

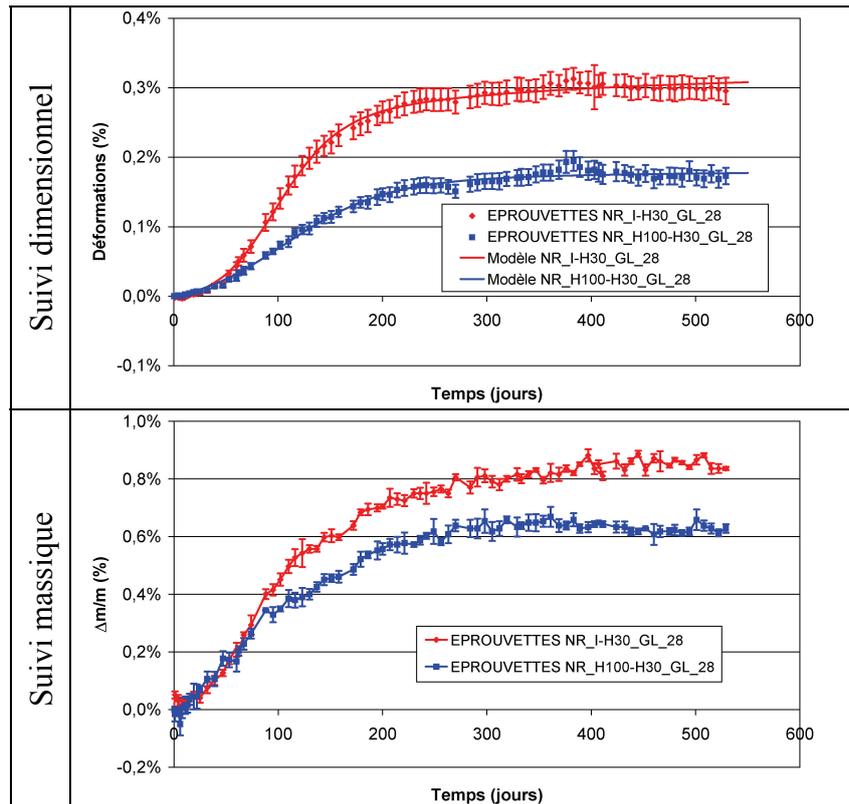


Figure 3-38 : suivis dimensionnels et massiques – éprouvettes NR – conservation en eau et à 100 % HR

La Figure 3-39 représente l'évolution des déformations en fonction des variations relatives de masse. On observe, comme pour les éprouvettes R1 et R2, l'existence d'une relation affine entre ces deux paramètres. Néanmoins, les comportements hydriques des formules NR et R1 sont sensiblement différents (les pentes de régression sont nettement différentes, cf. Tableau 3-15). La seule différence entre ces deux formules étant le ciment utilisé, c'est donc cet élément qui est à l'origine de ce changement. Ceci peut correspondre à un changement de microstructure (microporosité et interfaces pâte - granulat notamment) pouvant conduire à des transformations du comportement hydrique et mécanique du matériau.

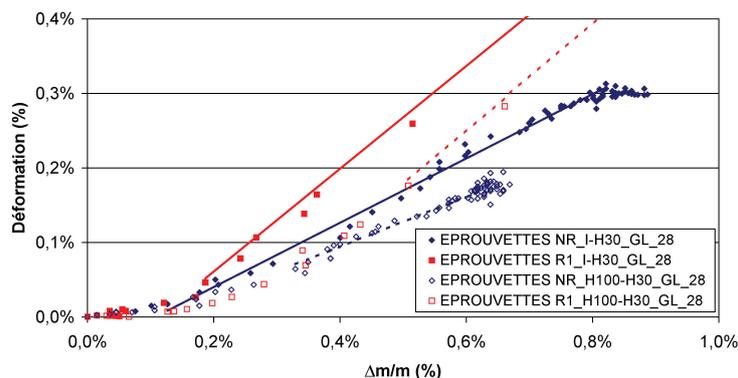


Figure 3-39 : évolution des déformations en fonction de la prise de masse – éprouvettes NR et R1 – conservation en eau et à 100 % HR

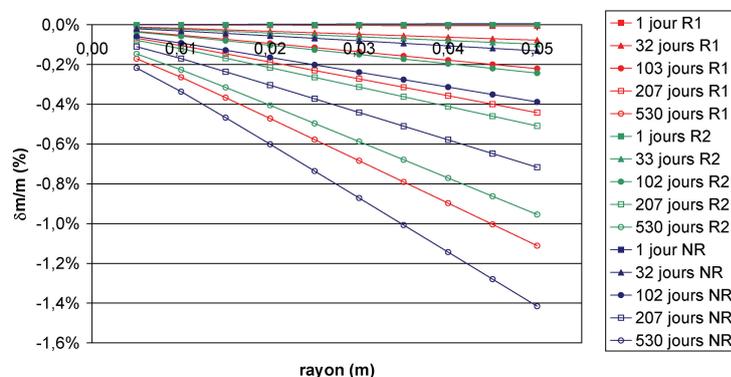
Tableau 3-15 : régression linéaire entre déformation et variations de masse – éprouvettes NR et R1 – conservation en eau et à 100 % HR

	Pente	Ordonnée à l'origine	Coefficient de corrélation
NR_I-H30_GL_28	0,431	-0,046%	0,9947
R1_I-H30_GL_28	0,690	-0,077%	0,9992
NR_H100-H30_GL_28	0,334	-0,039%	0,9873
R1_H100-H30_GL_28	0,721	-0,182%	0,9994

On note également que les pentes de régression linéaire correspondant aux éprouvettes conservées immergées et à 100 % HR sont différentes ce qui n'a pas été observé pour les autres matériaux. Les corps d'épreuve correspondants ont été fabriqués de manière identique (matériaux issus de la même gâchée, même méthode de mise en œuvre et de préparation). Les essais sur bétons frais ont mis en évidence un affaissement du matériau NR de l'ordre de 16 cm (cf. Chapitre 2). Cette fluidité supérieure à la cible de 10 cm que nous nous étions fixée a pu conduire à des hétérogénéités dans les éprouvettes (possibilité de ségrégation même si aucun signe caractéristique n'a pu être mis en évidence lors de la fabrication des corps d'épreuve) potentiellement responsables de ces différences. Des différences de porosité ont pu se développer liées à des répartitions granulaires différentes et ainsi aboutir à des comportements hydriques différents.

5.2 Eprouvettes non soumises à un échange hydrique

La Figure 3-41 compare les suivis dimensionnels et massiques des éprouvettes de gonflement libre NR, R1 et R2 conservées sous scellement aluminium. Les trois formules présentent un comportement mécanique similaire : la formule NR présente un retrait de séchage de l'ordre de -0,4 ‰ en fin de suivi. En revanche, les éprouvettes NR font état d'un séchage un peu plus important (perte relative de masse de l'ordre de -1,2 ‰ en 530 jours), probablement liée au changement de ciment par rapport aux formules R1 et R2. Toutefois, l'évaluation des profils de séchage au sein des corps d'épreuve montre que le cœur des éprouvettes n'est que très peu touché par le front de séchage durant toute la période de suivi (cf. Figure 3-40). Une fois de plus, il est possible que l'absence de gonflement sur la période de suivi puisse être liée à un effet de cinétique plutôt qu'à un manque d'eau. Ceci pourrait être d'autant plus vrai que le caractère expansif du béton NR est bien moins marqué que pour les bétons R1 et R2.

**Figure 3-40 : comparaison des profils de séchage calculés des éprouvettes NR, R1 et R2 conservées sous scellement**

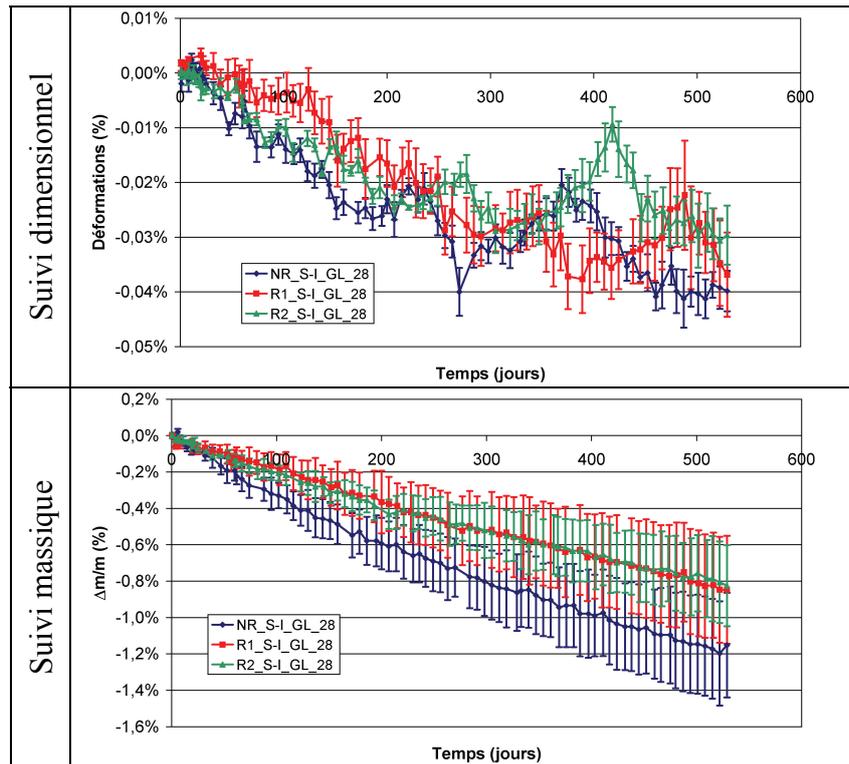


Figure 3-41 : comparaison des suivis dimensionnels et massiques des éprouvettes NR, R1 et R2 – conservation sous scellement aluminium

5.3 Eprouvettes soumises à un séchage à 30 % HR

La Figure 3-43 représente les suivis dimensionnels et massiques des éprouvettes NR, R1 et R2 soumises à un séchage dans une atmosphère à 30 % HR. Comme pour les corps d'épreuve conservés sous scellement, on remarque des comportements mécaniques similaires pour les trois matériaux. Les éprouvettes NR font état d'un retrait de séchage de -0,7 ‰ après 530 jours d'exposition. Les suivis massiques montrent un comportement général commun. Néanmoins, le séchage des corps d'épreuve NR est légèrement plus important et plus rapide et conduit à une progression plus rapide du front de séchage au sein du corps d'épreuve (cf. Figure 3-42). Comme pour les corps d'épreuve scellés, cette différence de comportement est probablement imputable à l'utilisation du ciment_NR, seule différence par rapport aux matériaux R1 et R2 aux squelettes granulaires équivalents.

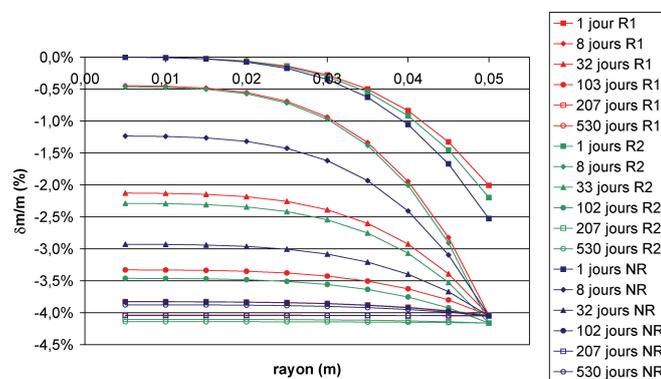


Figure 3-42 : comparaison des profils de séchage des éprouvettes NR, R1 et R2 conservées à 30 % HR

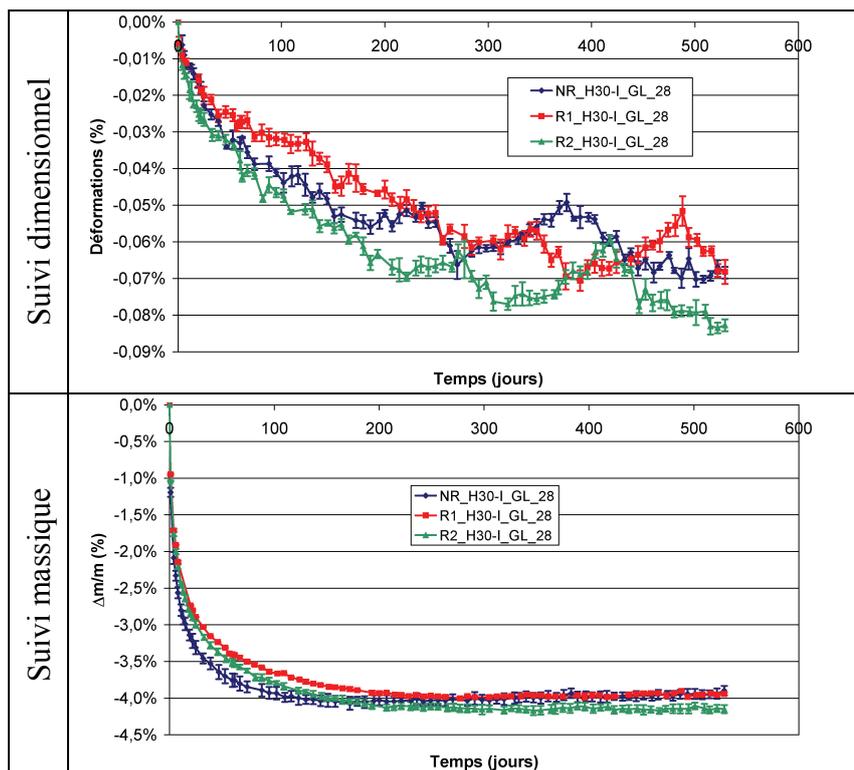


Figure 3-43 : comparaison des suivis dimensionnels et massiques des éprouvettes NR, R1 et R2 – conservation à 30 % HR

5.4 Conclusions

Dans cette section, on a présenté les résultats issus d'essais de gonflement libre réalisés pour la formule NR : malgré l'utilisation d'un ciment PM ES (ciment_NR) à faible teneur en sulfates, en aluminates et en alcalins, le couple traitement thermique/ciment considéré dans cette étude conduit au développement de gonflements de RSI. Ceux-ci sont beaucoup moins importants que ceux évalués pour les éprouvettes R1 mais néanmoins comparables à ceux occasionnés par une RAG rapide et de forte amplitude. Ainsi, l'utilisation d'un ciment CEM I PM ES ne garantit pas l'absence de gonflements : pour évaluer un risque de RSI, il est nécessaire de caractériser un couple ciment/traitement thermique (*Kretz et al. 2007*). On notera que le cas d'utilisation de ciment CEM I PM ES présenté dans cette section se situait à la limite des recommandations de prévention (*Kretz et al. 2007*) en termes de température maximale (préconisée comprise entre 75°C et 85°C pour le niveau de prévention Bs). A l'instar des conclusions de l'étude bibliographique (cf. Chapitre 1), ceci confirme également que les seules considérations de composition cimentaire ne suffisent pas à évaluer le risque de RSI.

Le suivi des corps d'épreuve non soumis à un apport d'eau (i.e. conservation sous scellement aluminium et séchage à 30 % HR) montre que les trois matériaux NR, R1 et R2 présentent des comportements similaires vis-à-vis du séchage, et ce malgré un séchage légèrement plus rapide de la formule NR. Cette modification du comportement hydrique semble être la conséquence de l'utilisation du ciment_NR. Pour les éprouvettes conservées à 30 % HR, le front de séchage atteint rapidement le cœur du matériau, bloquant ainsi le développement de RSI par manque d'eau (cf. sections 3.2 et 4.3). En revanche, le cœur des éprouvettes conservées sous scellement aluminium semble être encore très humide en fin de phase de suivi (perte de masse à cœur estimée à environ 0,1 % après une durée

d'exposition de l'ordre du temps de latence des gonflements en eau) : l'absence de gonflement durant les 530 jours d'exposition pourrait être la conséquence d'un effet de cinétique plutôt que d'un manque d'eau.

6 Suivi d'un béton non réactif

Le programme expérimental de cette étude prévoyait à l'origine l'utilisation de la formule NR comme formule « témoin » ne devant pas développer de gonflements. Les résultats expérimentaux collectés ont permis de montrer que l'utilisation d'un ciment CEM I PM ES ne s'est pas révélée être une condition suffisante pour empêcher la RSI, la cure thermique appliquée étant suffisamment sévère pour permettre la déstabilisation puis la re-précipitation d'ettringite (cf. section 5).

Afin de disposer d'une formule témoin effectivement non réactive, des essais de gonflement libre ont été mis en œuvre à l'aide de la formule BT : il s'agit d'un matériau de composition identique au béton NR mais non soumis à la cure thermique. En revanche, afin de disposer de conditions de cure hydrique semblables aux autres matériaux de cette étude, les corps d'épreuve fabriqués sont conservés en eau à 20°C durant une semaine (durée équivalente à la cure thermique).

6.1 Corps d'épreuve immergés

La Figure 3-44 compare les évolutions dimensionnelles et massiques des éprouvettes de gonflement libre BT et NR conservées en eau. Sur ce graphique, les suivis des corps d'épreuve non réactifs de (*Multon 2004*) de composition proche sont également représentés. Pour les éprouvettes BT_I-H30_GL_28, on n'observe aucun gonflement à l'issue des 530 jours d'exposition. Ceci confirme l'impossibilité de développer des expansions pour ce matériau en l'absence de cure thermique. On mesure un léger retrait (de l'ordre de -0,2 ‰ à 530 jours) contrairement au béton témoin de (*Multon 2004*). Ce phénomène s'explique par les différences de cure hydrique entre les deux matériaux : les éprouvettes de (*Multon 2004*) ont fait prise dans des conditions « standards », c'est-à-dire à température ambiante à l'air libre avec une protection vis-à-vis de la dessiccation en partie supérieure. Les corps d'épreuve BT_I-H30_GL_28 ont quant à eux réalisé leur prise en eau. Il est donc probable que ces corps d'épreuve se trouvent dans un état proche de la saturation à l'issue de la cure, expliquant ainsi l'absence des gonflements hydriques mesurés par (*Multon 2004*).

La prise de masse du béton BT est de l'ordre de 0,25 % après 500 jours d'exposition et semble être stabilisée. Cette valeur est sensiblement plus faible que les ordres de grandeurs issus de (*Multon 2004*) : une formule non réactive équivalente faisait état d'une prise de masse d'environ 1 % après 500 jours de suivi. Cette différence peut s'expliquer une fois de plus par les différences de conditions de cure des corps d'épreuve après coulage induisant des degrés de saturation initiaux différents.

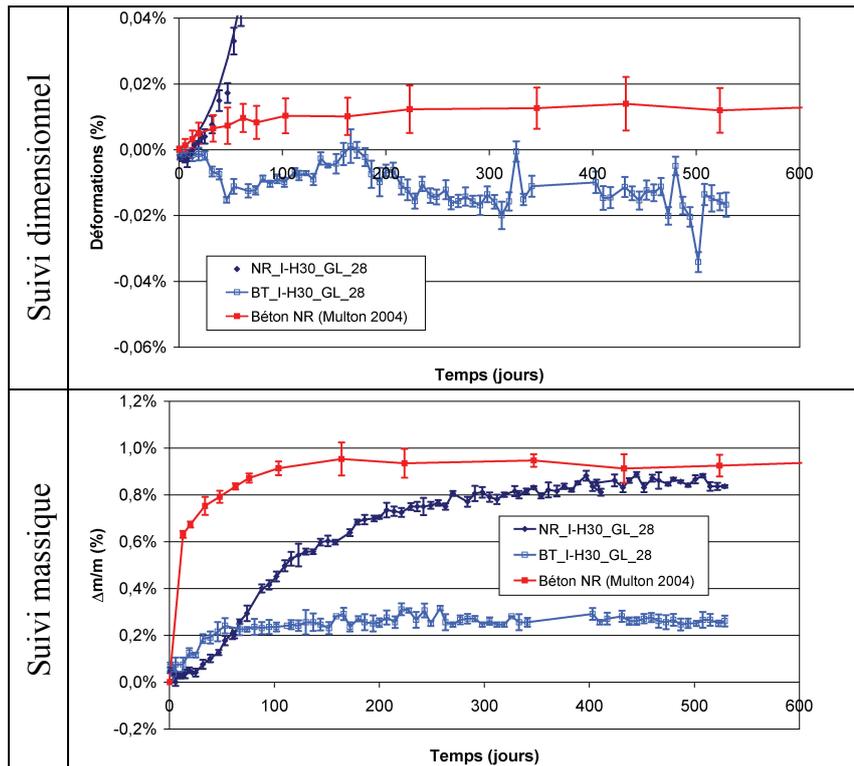


Figure 3-44 : comparaison des suivis dimensionnels et massiques des éprouvettes BT, NR et des éprouvettes non réactives de (Multon 2004) – conservation en eau

6.2 Corps d'épreuve soumis à un séchage

Les suivis des formules BT et NR montrent des évolutions dimensionnelles en dessiccation comparables (cf. Figure 3-45), le retrait étant néanmoins légèrement moins sévère pour le matériau BT. Toutefois, il est remarquable que les comportements hydriques diffèrent de manière significative : la masse des éprouvettes BT varie plus lentement que celle des éprouvettes NR mais semble avoir atteint une valeur asymptotique de l'ordre de -3,5 %. La Figure 3-46 illustre ce phénomène en termes de profil de séchage pour les deux matériaux. Cette différence est potentiellement imputable à la cure thermique : les dilatations différentielles entre pâte de ciment et granulats lors de l'échauffement du matériau NR peuvent conduire à une plus grande interconnexion des pores et donc à des phénomènes de transfert hydrique plus rapides. De plus, de nombreux travaux expérimentaux ont montré qu'une élévation de température lors de la prise conduit à une structure poreuse plus grossière (e.g. Laplante 1993, Scrivener & Taylor 1993, Glasser et al. 1995, Patel et al. 1995).

Par ailleurs, on note que les variations massiques des éprouvettes BT et des éprouvettes non réactives de (Multon 2004) sont similaires. Ceci confirme la cohérence de la formulation des matériaux de la présente étude : la structure granulaire des bétons a été mise au point pour être comparable à celle de (Multon 2004). Les différences entre les matériaux non traités thermiquement de cette étude et ceux de (Multon 2004) peuvent provenir d'une différence de saturation initiale.

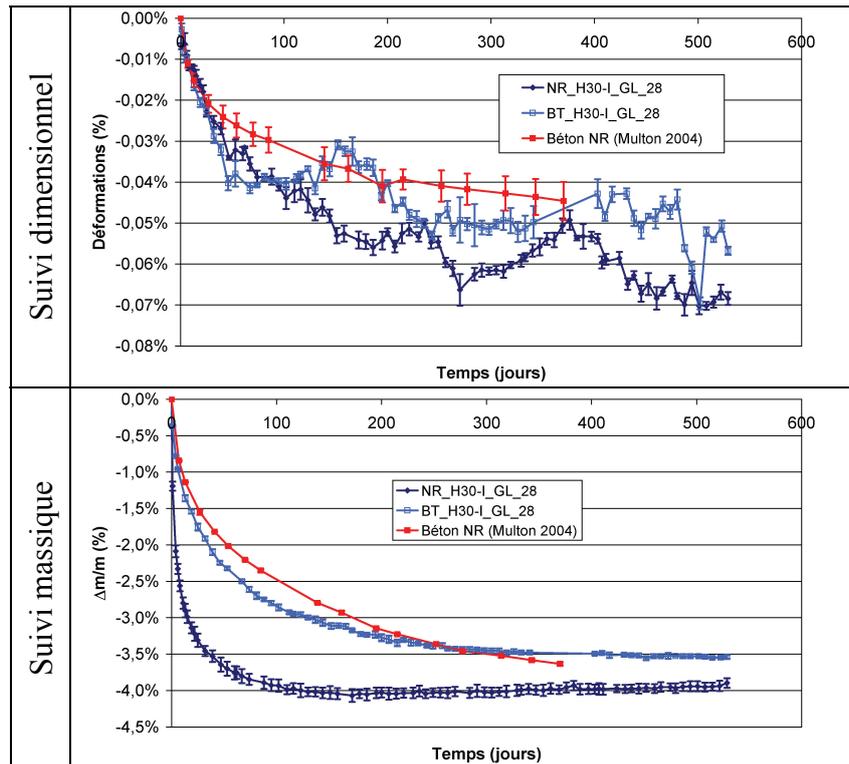


Figure 3-45 : comparaison des suivis dimensionnels et massiques des éprouvettes BT, NR et des éprouvettes non réactives de (Multon 2004) – conservation à 30 % HR

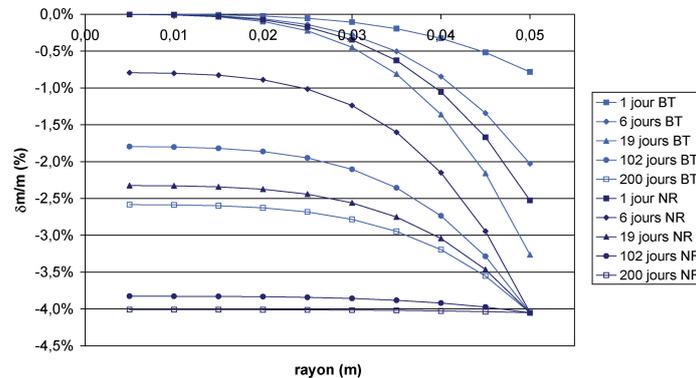


Figure 3-46 : comparaison des profils de séchage des éprouvettes NR et BT conservées à 30 % HR

6.3 Conclusions

Le matériau BT, de composition identique à NR mais non soumis à une cure thermique, ne développe effectivement aucun gonflement jusqu'à une échéance de 530 jours à 38°C. Par cette technique expérimentale, on peut donc disposer d'un matériau témoin ne développant aucune pathologie. Toutefois, les différences de conditions de cure thermique conduisent à la fabrication de matériaux de microstructure différente. Mettre au point un matériau sain dont les caractéristiques microscopiques sont représentatives de matériaux atteints de RSI se révèle donc particulièrement délicat. Dans l'idéal, il conviendrait de disposer de matériaux ne développant aucun gonflement malgré l'application d'une cure thermique sévère telle que celle mise en œuvre dans le cadre de ces travaux.

7 Comportement hydrique des matériaux : interprétations

7.1 Retrait de dessiccation

Le calcul de la progression du front de séchage, tel qu'il a été fait pour les éprouvettes de gonflement libre conservées à 30 % HR, permet de déterminer les variations relatives de masse de n'importe quelle partie d'un corps d'épreuve (cf. section 3.2). Les calculs menés pour les différents cas de figure expérimentaux ont montré que, bien que de dimensions réduites, les éprouvettes de gonflement libre séchées développent des gradients hydriques. En perspective du traitement des essais sur poutres (cf. Chapitre 4), il est souhaitable d'établir, à l'instar des travaux de (Multon 2004), une relation entre perte de masse locale et déformation de retrait. La notion de « valeur locale » correspond cependant dans notre approche à une échelle centimétrique. En effet, la première mesure de gammadensimétrie sur les structures est située à 10 mm de profondeur par rapport à la face supérieure. Le point de mesure suivant est située 20 mm plus en profondeur. La première mesure de variation relative de masse est donc considérée dans l'analyse hydrique des poutres comme étant représentative des 20 mm supérieurs de la structure. On cherche donc ici à établir une relation entre la déformation de retrait mesurée sur éprouvette et la variation relative de masse de la couche extérieure de 2 cm d'épaisseur des éprouvettes. Cette dernière grandeur peut être évaluée sur la base de la mesure de masse globale et de l'approche présentée en section 3.2. La relation entre contraction hydrique et variation de masse intervient par ailleurs directement dans la modélisation du comportement des structures par des outils tels que le module RGIB (Baghdadi 2008) de CESAR-LCPC prenant en compte le retrait de séchage.

La Figure 3-47 représente la déformation de retrait mesurée en fonction de la variation relative de masse de la couronne de béton de 20 mm d'épaisseur située en surface d'une éprouvette pour le béton R1 et pour le béton réactif de (Multon 2004). La variation de masse de cette partie des corps d'épreuve est obtenue par application de la relation (3-4).

(Multon 2004) propose une représentation linéaire de la relation entre ces deux paramètres. A la lumière de nos investigations, nous avons privilégié une représentation bilinéaire. (Granger et al. 1997-b) notent effectivement que l'évolution du retrait de séchage en fonction de la perte de masse n'est pas linéaire dans son ensemble. Selon eux, la première partie de la courbe dont la pente est assez faible correspond à une fissuration en peau du matériau sous les effets du retrait empêché (le cœur de l'éprouvette s'oppose au retrait de la peau). Par la suite, au delà d'un certain seuil de variation relative de masse, on observe une évolution linéaire de la déformation en fonction de la perte de masse. (Granger et al. 1997-b) proposent d'expliquer ce comportement par deux hypothèses différentes :

- Hypothèse 1 : Après une ouverture rapide de fissures peu profondes imputables au retrait de peau empêché, le retrait de séchage devient contrôlé après un certain temps par les pertes de masse du cœur de l'éprouvette. La pente de la courbe durant cette dernière phase est dans ce cas une propriété intrinsèque du matériau. En l'absence de fissuration en surface, la relation entre retrait de séchage et perte de masse serait une droite de même pente et passant par l'origine.

- Hypothèse 2 : la fissuration initiale se referme entièrement sous les effets du fluage. Ainsi, en l'absence de fissuration, la relation entre retrait et perte de masse serait une droite passant par l'origine et tangente à la courbe de réponse expérimentale au moment où le fluage s'annule. Selon (*Granger et al. 1997-b*), si cette hypothèse n'est pas à exclure, il paraît peu probable que les fissures se referment complètement : en effet, cette fissuration contribue notamment à la libération d'auto-contraintes internes (notamment retrait de la pâte empêché en partie par les granulats).

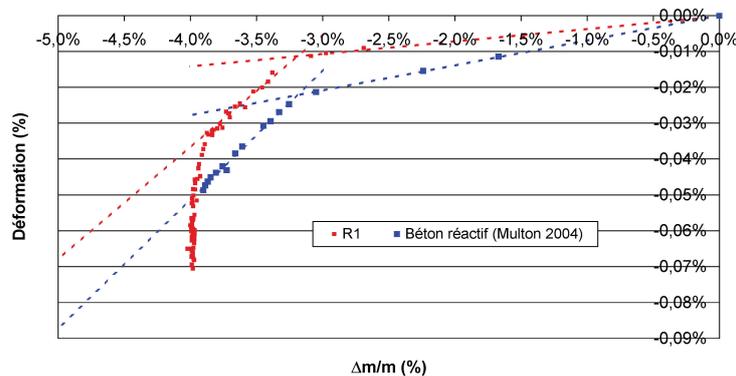


Figure 3-47 : déformation de retrait mesurée en fonction de la variation relative de masse d'une couronne de béton de 2 cm d'épaisseur – formule R1 et béton réactif de l'étude (*Multon 2004*)

Le béton réactif de (*Multon 2004*) et le béton R1 montrent un comportement général similaire. En particulier, avec des pentes respectives de 0,0363 et 0,0314 pour la seconde portion linéaire (i.e. entre -3 % et -4 % de perte de masse de la couronne de béton extérieure), et en considérant l'hypothèse 1 avancée par (*Granger et al. 1997-b*), ces deux matériaux semblent avoir une relation retrait de dessiccation – perte de masse similaire. L'ordre de grandeur de ces pentes est cohérent avec les valeurs de l'ordre de 0,02 proposées par (*Granger et al. 1997-b*).

D'autre part, la pente initiale est sensiblement différente pour les deux matériaux (respectivement 0,0070 et 0,0035). Ceci pourrait indiquer une fissuration différente en peau sous les effets du retrait empêché : le béton R1 pourrait développer une fissuration moins importante pour un séchage équivalent au béton réactif de (*Multon 2004*). En d'autres termes, pour un « chargement hydrique » comparable (c'est-à-dire un séchage), le béton R1 développe des déformations plus faibles et présente donc une « rigidité hydrique » plus importante que la rigidité du matériau de (*Multon 2004*) dégradé par une fissuration plus marquée ([*Granger et al. 1997-b*]) définissent ainsi le coefficient de contraction hydrique comme le rapport entre la pente entre déformation et perte relative de masse et la masse volumique du matériau).

La Figure 3-48 et le Tableau 3-16 synthétisent les résultats concernant les relations existant entre déformation de retrait et perte de masse pour les cinq bétons étudiés dans cette thèse. Les coefficients de contraction hydrique tels que définis par (*Granger et al. 1997-b*) sont respectivement égaux à $24,8 \cdot 10^{-6}$, $13,5 \cdot 10^{-6}$ et $13,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ pour les bétons NR, R1 et R2 durant la seconde phase linéaire (ordre de grandeur de $10 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ pour le béton étudié par [*Granger et al. 1997-b*]). Globalement, durant la première phase, on peut distinguer deux groupes : les matériaux non traités thermiquement et les matériaux traités thermiquement. Les seconds présentent une pente initiale plus faible. Ces différences peuvent potentiellement s'expliquer par des différences de fissuration imputables à un retrait empêché en surface.

A l'exception des matériaux NR, BT et R3, les pentes de régression linéaire durant la seconde phase sont comparables pour les différents matériaux. Selon les considérations de (Granger *et al.* 1997-*b*), ceci tendrait à indiquer des comportements de retrait de dessiccation similaires une fois le procédé piloté par la perte de masse du cœur de l'éprouvette considérée. La pertinence des différences notées avec les bétons BT et R3 est difficile à évaluer : en effet, les données issues du suivi de ces corps d'épreuve font état d'un comportement qu'il est plus délicat d'assimiler à un droite (cf. Figure 3-48). En revanche, NR présente clairement une pente différente de celle des matériaux R1 et R2. A priori, la seule différence entre ces différents bétons réside dans le ciment (ciment_NR pour la formule NR et ciment_R pour les formules R1 et R2). Il est donc envisageable que ce changement de liant conduise à une modification du comportement vis-à-vis du retrait de dessiccation, aboutissant à une contraction hydrique plus importante pour le béton NR.

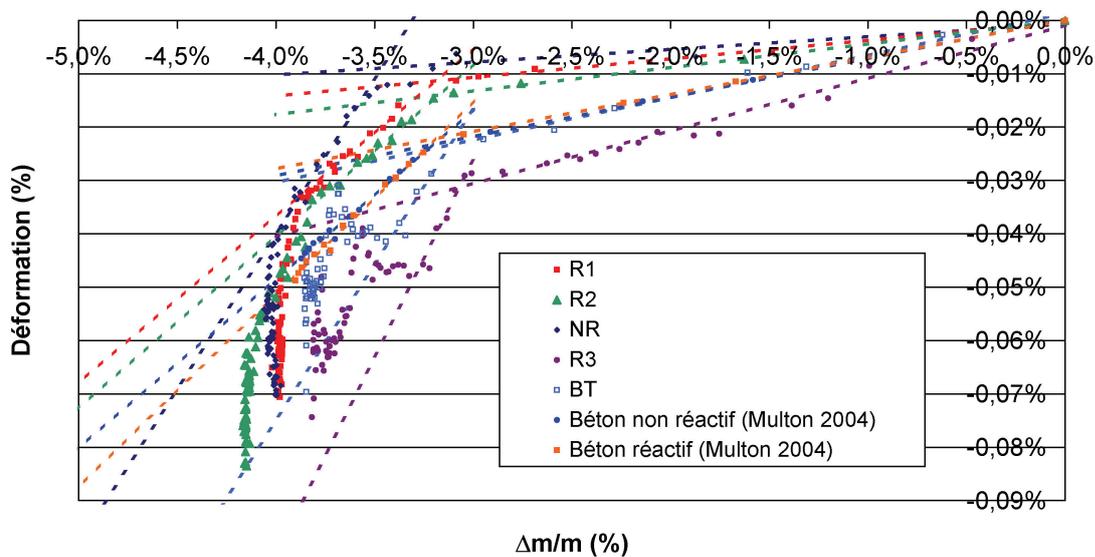


Figure 3-48 : déformation de retrait mesurée en fonction de la variation relative de masse d'une couronne de béton de 2 cm d'épaisseur

Tableau 3-16 : régressions linéaires entre déformation de retrait et variation relative de masse d'une couronne de béton de 2 cm d'épaisseur (κ = coefficient de contraction hydrique)

	BT	NR	R1	R2	R3	R (Multon 2004)	NR (Multon 2004)
Partie 1							
Pente	0,0080	0,0024	0,0035	0,0044	0,0099	0,0070	0,0073
Ordonnée à l'origine	0,0015%	-0,0006%	-0,0002%	0,0000%	-0,0009%	0,0001%	0,0003%
R ²	0,983	0,845	0,991	0,997	0,971	1,000	0,998
Partie 2							
Pente	0,0581	0,0578	0,0314	0,0323	0,0738	0,0363	0,0318
Ordonnée à l'origine	0,1576%	0,1912%	0,0892%	0,0888%	0,1951%	0,0938%	0,0789%
κ (m ³ .kg ⁻¹)	25,0.10 ⁻⁶	24,8.10 ⁻⁶	13,5.10 ⁻⁶	13,7.10 ⁻⁶	31,2.10 ⁻⁶	-	-
R ²	0,869	0,960	0,944	0,982	0,926	0,993	0,987

7.2 Cas d'une expansion : origine de la prise de masse ?

De la Figure 3-49 à la Figure 3-52, on synthétise les suivis dimensionnels en fonction des variations de masse pour l'ensemble des expérimentations présentées dans les sections 3, 4 et 5. On observe systématiquement une relation affine entre ces deux paramètres au delà d'un certain seuil de gonflement.

A priori, les réactions de gonflement se développant au cours de ces différents essais de gonflement libre sont différentes (en termes chimiques et cinétiques) car les solutions de stockage, la température de stockage ou même la composition des matériaux sont différentes. Pourtant les matériaux R1 et R2 présentent des comportements hydriques comparables, indépendamment de la condition de conservation considérée (cf. pentes données dans le Tableau 3-17). Ceci pourrait indiquer que la modification du comportement hydrique des matériaux est principalement une conséquence des effets mécaniques des gonflements et non des effets chimiques : la prise de masse pourrait être essentiellement le résultat de l'imbibition du matériau sous l'effet de la fissuration et non d'une absorption d'eau en tant que réactif pour former des produits de gonflement. A minima, la part d'eau absorbée comme réactif serait marginale par rapport à celle absorbée sous l'effet de l'ouverture du réseau poreux lors des gonflements. Cette interprétation est appuyée par le fait que les matériaux peuvent être regroupés de la façon suivante :

- Matériaux R1 et R2
- Matériau NR
- Matériau R3

Chacun de ces groupes présente un comportement hydrique qui lui est propre. Malgré leurs différences de composition, les matériaux R1 et R2 ont été conçus pour présenter des caractéristiques mécaniques similaires (cf. Chapitre 2) en utilisant le même ciment_R et en ajustant les squelettes granulaires de compositions différentes. Le béton NR utilise quant à lui le ciment_NR : ce changement semble avoir un impact sur le comportement du matériau : ceci a déjà été noté lors de la comparaison des suivis dimensionnels et massique de la formule NR (cf. section 5) et lors de l'analyse du comportement du matériau vis-à-vis du retrait de séchage (cf. section 7.1) et se retrouve ici par cette modification de comportement hydrique lors d'un gonflement. Ce changement peut trouver son origine dans la modification de la microstructure de la pâte de ciment_NR par rapport au ciment_R. Enfin, le matériau R3 présente un comportement hydrique lui aussi différent : n'ayant pas subi de cure thermique, la microstructure du matériau s'en trouve modifiée, impactant alors son comportement vis-à-vis de l'eau lors du développement des gonflements.

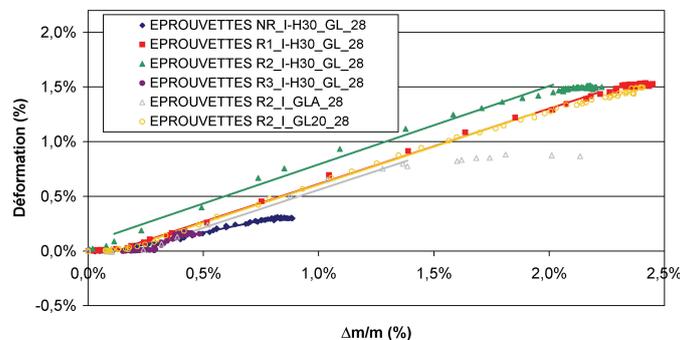


Figure 3-49 : suivi des déformations en fonction des variations relatives de masse – éprouvettes immergées

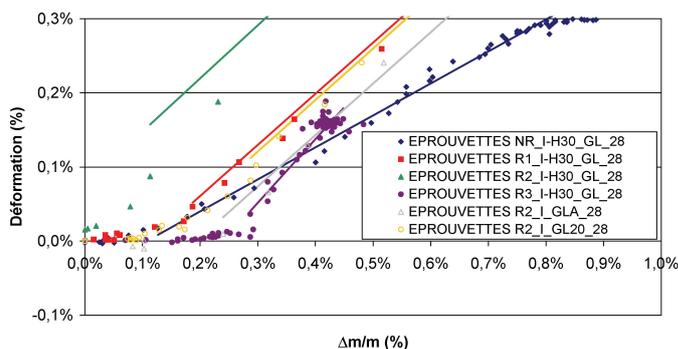


Figure 3-50 : suivi des déformations en fonction des variations relatives de masse – éprouvettes immergées (zoom)

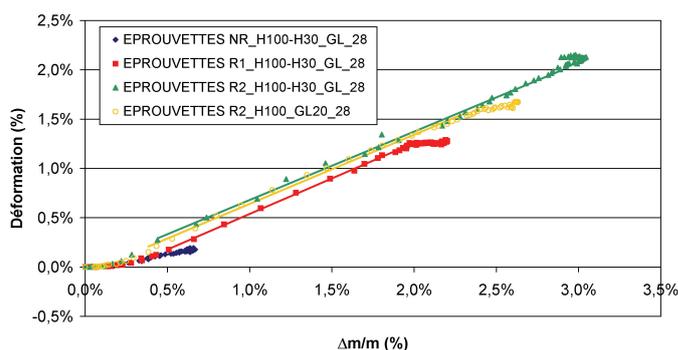


Figure 3-51 : suivi des déformations en fonction des variations relatives de masse – éprouvettes conservées à 100 % HR

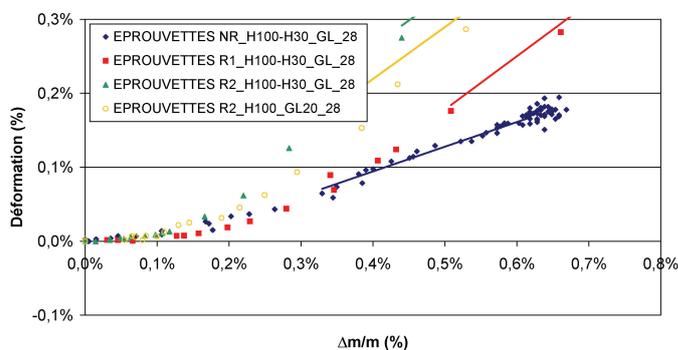


Figure 3-52 : suivi des déformations en fonction des variations relatives de masse – éprouvettes conservées à 100 % HR (zoom)

Tableau 3-17 : régressions linéaires entre déformations et variations de masse – éprouvettes immergées et à 100 % HR

	Pente	Ordonnée à l'origine	Coefficient de corrélation
NR_I-H30_GL_28	0,431	-0,046%	0,9947
R1_I-H30_GL_28	0,690	-0,077%	0,9992
R2_I-H30_GL_28	0,716	0,076%	0,9936
R3_I-H30_GL_28	0,859	-0,206%	0,9768
R2_I_GLA_28	0,693	-0,134%	0,9944
R2_I_GL20_28	0,695	-0,088%	0,9988
NR_H100-H30_GL_28	0,334	-0,039%	0,9873
R1_H100-H30_GL_28	0,721	-0,182%	0,9994
R2_H100-H30_GL_28	0,694	-0,014%	0,9977
R2_H100_GL20_28	0,701	-0,061%	0,9979

Afin de mieux comprendre les mécanismes de prise de masse lors de l'expansion des matériaux, il est nécessaire de confronter les déformations aux variations massiques mesurées à la lumière d'hypothèses relatives aux mécanismes de gonflement mis en jeu. Dans ce cadre, (*Barbarulo 2002*) développe dans ses travaux une analyse des prises de masse en fonction des expansions. Dans cette approche, on considère qu'après une cure thermique, le développement de gonflements est le fruit d'une réaction chimique entre des réactifs et de l'eau conduisant à la formation de produits. On note le gain de masse et la variation de volume associés à cette réaction suivant la relation (3-11).

$$\begin{cases} \Delta m_{\text{réaction}} = m_{\text{produits}} - m_{\text{réactifs}} \\ \Delta V_{\text{réaction}} = V_{\text{produits}} - V_{\text{réactifs}} \end{cases} \quad (3-11)$$

La masse du corps d'épreuve peut également évoluer du fait de la variation de la porosité et de la fissuration. On note ϕ_1 les espaces poreux initiaux et ϕ_2 les espaces poreux finaux. Leurs volume et masse sont notés respectivement V_{ϕ_i} et m_{ϕ_i} . On peut alors définir une variation de volume des espaces poreux et la variation massique associée (espaces poreux plus ou moins remplis d'eau) :

$$\begin{cases} \Delta V_{\phi} = V_{\phi_2} - V_{\phi_1} \\ \Delta m_{\phi} = m_{\phi_2} - m_{\phi_1} \end{cases} \quad (3-12)$$

Trois cas de figure se présentent pour l'interprétation de ΔV_{ϕ} :

- $\Delta V_{\phi} = 0$: la porosité est inchangée, les produits se sont formés sans combler la porosité initiale et ont entièrement participé à l'expansion du matériau (toutes les nouvelles fissures créées sont remplies du produit de réaction) ;
- $\Delta V_{\phi} > 0$: création d'une porosité nouvelle (fissuration) qui n'est pas remplie par les produits de réaction ;
- $\Delta V_{\phi} < 0$: il y a globalement remplissage de la porosité et des fissures.

Finalement, le gain de masse et la variation volumique d'un corps d'épreuve s'écrivent respectivement suivant les relations (3-13) et (3-14).

$$\Delta m = \Delta m_{\text{réaction}} + \Delta m_{\phi} \quad (3-13)$$

$$\Delta V = \Delta V_{\text{réaction}} + \Delta V_{\phi} \quad (3-14)$$

En supposant que les gonflements sont isotropes, il est possible d'écrire la relation (3-15), en négligeant les termes d'ordre supérieur à 1. Par combinaison avec la relation (3-16), il vient l'expression (3-17) fournissant une estimation de la pente des courbes $\varepsilon=f(\Delta m/m)$ représentées de la Figure 3-49 à la Figure 3-52.

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V} \approx 3 \cdot \varepsilon \text{ avec } \varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (3-15)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\varepsilon_V}{\Delta m/m} = \frac{\Delta V/V_{ini}}{\Delta m/m_{ini}} = \frac{m_{ini}}{V_{ini}} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta m} = M_V \cdot \frac{\Delta V}{\Delta m} \\ M_V = \text{masse volumique initiale du matériau} \end{array} \right. \quad (3-16)$$

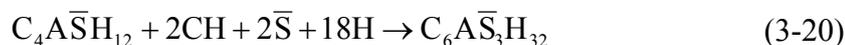
$$\frac{\varepsilon}{\Delta m/m} = \frac{1}{3} \cdot M_V \cdot \frac{\Delta V}{\Delta m} = \frac{1}{3} \cdot M_V \cdot \frac{\Delta V_{réaction} + \Delta V_{\Phi}}{\Delta m_{réaction} + \Delta m_{\Phi}} \quad (3-17)$$

Dans les conditions de conservation considérées (immersion ou 100 % HR), on suppose que tous les vides du matériau sont saturés en eau. Les fissures étant toutes remplies d'eau, il est possible d'écrire les relations (3-18) et (3-19).

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta m_{\Phi} = \rho_{eau} \cdot \Delta V_{\Phi} \\ \rho_{eau} = \text{masse volumique de l'eau} \end{array} \right. \quad (3-18)$$

$$\frac{\varepsilon}{\Delta m/m} = \frac{1}{3} \cdot \frac{M_V}{\rho_{eau}} \cdot \frac{\Delta V_{réaction} + \Delta V_{\Phi}}{\frac{\Delta m_{réaction}}{\rho_{eau}} + \Delta V_{\Phi}} \quad (3-19)$$

(Barbarulo 2002) pose alors l'hypothèse que les gonflements sont le fruit d'une conversion du monosulfate en ettringite suivant la réaction (3-20). Cette hypothèse est forte et préjuge fortement du mécanisme d'expansion mis en jeu dans le cadre de la RSI mais est nécessaire pour évaluer les variations volumiques et massiques imputables à la RSI.



(Barbarulo 2002) donne les masses et volumes molaires des réactifs et des produits de cette réaction. Ces données sont rappelées dans le Tableau 3-18.

Tableau 3-18 : caractéristiques des produits et des réactifs de la conversion du monosulfate en ettringite

	Masse molaire (g/mol)	Volume molaire (cm ³ /mol)	Masse volumique (g/cm ³)
Monosulfoaluminate	622	313	1,99
Ettringite	1255	725	1,73
Portlandite	74	33	2,23
Sulfates	80	30	2,67
Eau	18	18	1,00

Ainsi, en approximant le volume des sulfates présents dans les CSH par le volume des ions sulfates, il vient :

$$\Delta m_{réaction} = 18 \cdot 18 = 324 \text{ g/mol}$$

$$\Delta V_{réaction} = 725 - 313 - 2 \cdot 33 - 2 \cdot 30 = 286 \text{ cm}^3/\text{mol}$$

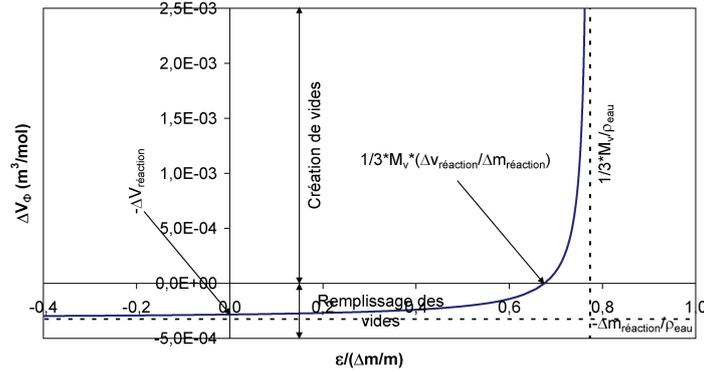


Figure 3-53 : exemple d'application numérique de la relation entre volume de l'espace poreux et rapport déformation/variation de masse – formule R1

A partir de ces données, il devient possible d'identifier la relation entre $\varepsilon/(\Delta m/m)$ et ΔV_ϕ pour les différents matériaux en connaissant leur masse volumique initiale. La Figure 3-53 illustre le fonctionnement de la relation (3-19) appliquée au cas du béton R1. Elle recense notamment tous les points particuliers correspondants à différents modes d'expansion.

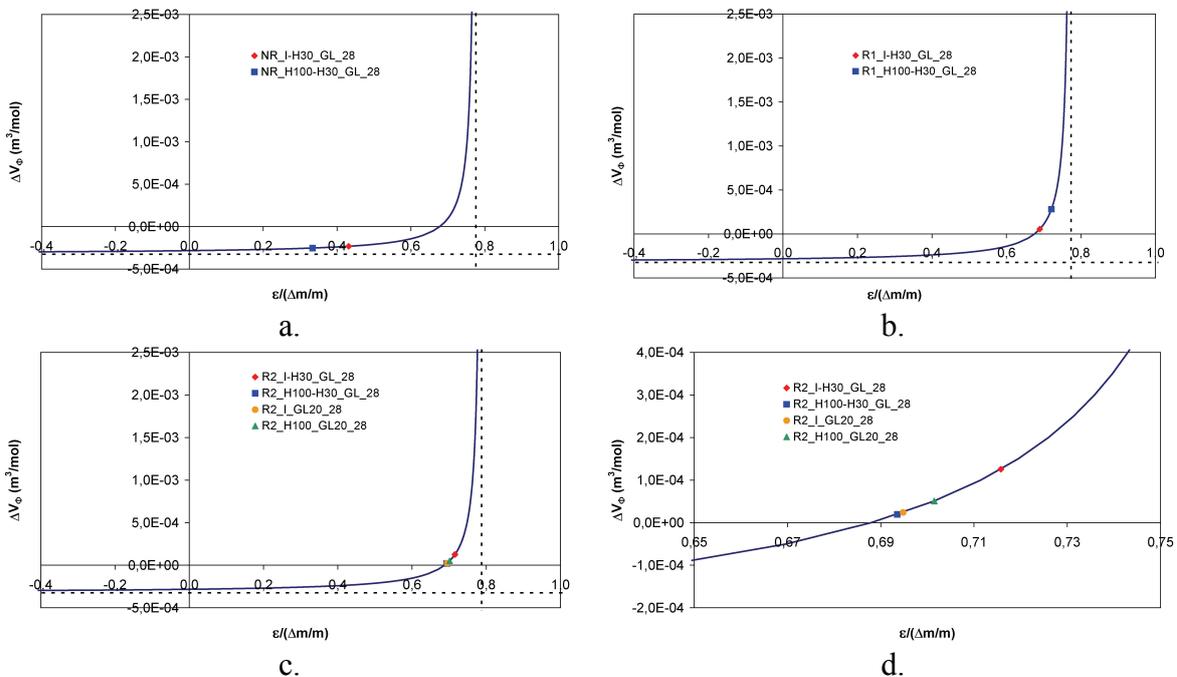


Figure 3-54 : évaluation de la variation de volume des vides lors de la phase de gonflement intense
 a. Eprouvettes NR
 b. Eprouvettes R1
 c. Eprouvettes R2
 d. Eprouvettes R2 (zoom)

La Figure 3-54 positionne chaque cas expérimental considéré dans les sections 3, 4 et 5 par rapport à la relation (3-19) durant la phase de gonflement intense pour laquelle nous avons établi une relation linéaire entre déformation et prise de masse. A l'aide des pentes de régression linéaire reportées dans le Tableau 3-17, on peut ainsi évaluer la variation de volume des vides par mole d'ettringite formée. A l'exception du matériau NR, on détermine dans tous les cas une variation positive du volume des vides : ceci implique la création d'une porosité nouvelle non comblée par la formation de produits de réaction. L'hypothèse de saturation des vides ayant été formulée, cette augmentation du volume des vides induit une prise de masse du matériau par pure absorption d'eau. Toutefois, ces

valeurs de ΔV_ϕ restent souvent relativement proches de zéro, indiquant selon ce raisonnement qu'une grande partie de la porosité nouvellement créée lors de l'expansion peut être remplie par les produits de réaction.

Le cas du matériau NR révèle un comportement particulier : la variation du volume des vides est dans ce cas négative, impliquant ainsi un remplissage de la porosité et des fissures (une porosité plus importante de NR sous l'effet du changement de ciment pourrait expliquer ce comportement). Ce résultat découle de la différence de pente entre déformation et prise de masse pour le matériau NR. Ce cas de figure est similaire aux investigations menées par (*Barbarulo 2002*). Ce dernier conclut que les hypothèses formulées au cours du raisonnement peuvent être erronées (partiellement ou totalement). Pour cet auteur, il se pourrait que le matériau ne soit pas complètement saturé en eau, conduisant ainsi à une modification de la relation (3-19) (*Barbarulo* considère des corps d'épreuve conservés à 100 % HR). Si ceci pouvait être envisageable pour nos corps d'épreuve conservés à 100 % HR, cela apparaît moins probable dans le cas d'une conservation en eau. En l'absence d'investigations complémentaires, il paraît délicat de tirer des conclusions plus poussées sur ce point.

Enfin, il convient de noter que les variations de ΔV_ϕ peuvent être très importantes pour de faibles variations de la pente entre déformation et prise de masse au delà de la valeur $1/3 \cdot M_V \cdot \Delta V_{\text{réaction}} / \Delta m_{\text{réaction}}$. Ainsi, une faible erreur sur la détermination de la pente peut conduire à évaluer des variations de volume des vides relativement différentes.

Si cette analyse permet d'approfondir notre raisonnement sur les mécanismes de prise de masse durant les expansions, elle reste néanmoins basée sur une hypothèse forte considérant que les expansions sont le fruit d'une conversion du monosulfate en ettringite (cf. relation (3-20)). Sans préjuger du mécanisme d'expansion, (*Meland et al. 1997*) ont quant à eux une approche basée sur la comparaison des gonflements volumiques et des variations massiques permettant d'évaluer la proportion de fissures nouvellement créées et remplies par de l'eau.

La relation (3-15) montre qu'il est possible d'estimer le gonflement volumique réel du matériau sur la base d'une mesure de déformation axiale, en supposant que les gonflements sont isotropes. L'augmentation de volume par mobilisation d'eau peut s'écrire sur la base de la relation (3-21) en considérant que l'augmentation de masse du corps d'épreuve est due à une pénétration d'eau. Si on considère qu'il existe une phase durant laquelle les expansions sont uniquement dues à la formation de fissures qui se remplissent d'eau, il vient $\Delta V = \Delta V_{\text{eau}}$ et il devient possible d'écrire la relation (3-22). Ainsi, en comparant les estimations de gonflement volumique obtenues à l'aide de la relation (3-15) à celles de la relation (3-22), il devient possible d'évaluer la pertinence de l'hypothèse de gain de masse par remplissage d'eau des fissures nouvellement formées : lorsque la relation entre les deux estimations est linéaire de pente égale à un, l'hypothèse $\Delta V = \Delta V_{\text{eau}}$ est a priori vérifiée et le gain de masse est dans ce cas le résultat d'une imbibition par remplissage des fissures. Plus simplement, cette méthode revient à comparer la variation de masse volumique réelle à celle qui résulterait d'un remplissage par l'eau du volume formé.

$$\Delta V_{\text{eau}} = \frac{\Delta m_{\text{eau}}}{\rho_{\text{eau}}} = \frac{\Delta m}{\rho_{\text{eau}}} \quad (3-21)$$

$$\begin{cases} \varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V_{ini}} = \frac{\Delta V_{eau}}{V_{ini}} = \frac{\Delta m}{\rho_{eau}} \cdot \frac{\rho_{béton}}{m} = \frac{\Delta m}{m} \cdot d_{béton} \\ d_{béton} = \text{densité du béton} \end{cases} \quad (3-22)$$

La Figure 3-55 illustre la forme générale des courbes obtenues par cette approche. On propose de considérer deux phases distinctes : durant la phase 2 représentée sur la Figure 3-55, on considère que le matériau est saturé (degré de saturation $S_r = 1$). Si l'hypothèse de remplissage des vides créés par l'eau est vérifiée, la courbe expérimentale est alors parallèle à la droite de pente unité passant par l'origine. En considérant que, durant la phase 1, la prise de masse correspond à un remplissage des espaces poreux initiaux du matériaux (ce qui semble plausible, cette phase étant achevée pour des expansions de l'ordre de 0,02 %, la contribution de création de fissures par l'expansion est probablement très faible – cf. ci-après), la distance de la courbe expérimentale à la bissectrice (que nous noterons h – cf. Figure 3-55) peut être considérée comme proportionnelle à la porosité du matériau (calcul donné ci-après).

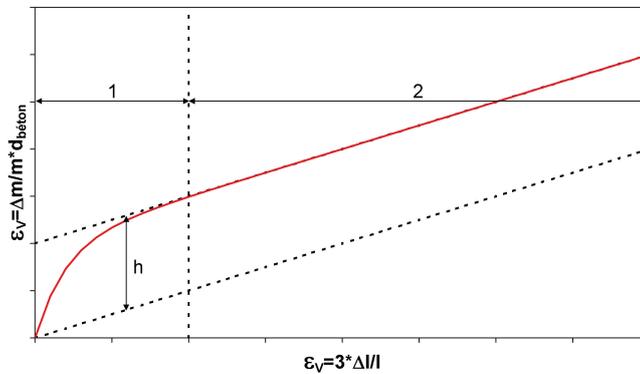


Figure 3-55 : forme générale de l'évolution comparée des estimations de gonflement volumique

En effet, de par la définition du calcul de gonflement volumique sur la base de la variation massique, il est possible d'écrire :

$$\begin{cases} h = \frac{M_{sat} - M_{ini}}{M_{ini}} \cdot d_{béton} \\ M_{sat} = \text{masse du matériau saturé} \\ M_{ini} = \text{masse initiale du matériau} \\ d_{béton} = \text{densité du matériau} \end{cases} \quad (3-23)$$

La masse sèche d'un matériau correspond à la masse mesurée lorsque tous les espaces poreux sont vidés de l'eau qu'ils peuvent contenir. Ainsi, on peut écrire :

$$\begin{cases} M_{sèche} = M_{sat} - p \cdot V \cdot \rho_{eau} \\ M_{sèche} = \text{masse sèche du matériau} \\ p = \text{porosité du matériau} \\ V = \text{volume du matériau} \\ \rho_{eau} = \text{masse volumique de l'eau} \end{cases} \quad (3-24)$$

Par définition, le degré de saturation d'un matériau s'écrit :

$$S_r = \frac{M - M_{\text{sèche}}}{M_{\text{sat}} - M_{\text{sèche}}} = \frac{M - M_{\text{sèche}}}{p \cdot V \cdot \rho_{\text{eau}}} \quad (3-25)$$

Il vient alors :

$$S_{r_{\text{sat}}} - S_{r_{\text{ini}}} = \frac{M_{\text{sat}} - M_{\text{sèche}}}{p \cdot V \cdot \rho_{\text{eau}}} - \frac{M_{\text{ini}} - M_{\text{sèche}}}{p \cdot V \cdot \rho_{\text{eau}}} = \frac{M_{\text{sat}} - M_{\text{ini}}}{p \cdot V \cdot \rho_{\text{eau}}} \quad (3-26)$$

Par combinaison des relations (3-23) et (3-26), on peut écrire

$$S_{r_{\text{sat}}} - S_{r_{\text{ini}}} = \frac{h \cdot M_{\text{ini}}}{p \cdot V \cdot \rho_{\text{eau}} \cdot d_{\text{béton}}} = \frac{h \cdot M_V \cdot V}{p \cdot V \cdot \rho_{\text{eau}} \cdot \frac{M_V}{\rho_{\text{eau}}}} \quad (3-27)$$

Finalement, on a, en remplaçant $S_{r_{\text{sat}}}$ par sa valeur (et en gardant à l'esprit les hypothèses formulées) :

$$h = (1 - S_{r_{\text{ini}}}) \cdot p \quad (3-28)$$

Cette relation n'a pas pour ambition de permettre un calcul de la porosité ou du degré de saturation initial du matériau connaissant h : les incertitudes de détermination de ces paramètres peuvent rapidement conduire à un biais. Par exemple, dans le cas des éprouvettes R1_I-H30_GL_28, l'estimation de la porosité à partir de cette relation conduit à une valeur de 4 % pour un degré de saturation de 0,95 et de 10 % pour un degré de saturation de 0,98. Si on considère la mesure du degré de saturation effectuée sur un morceau de béton R1 de 2 kg (masse saturée), en considérant une porosité de 10 %, la différence de masse pour une variation du degré de saturation de $0,98 - 0,95 = 0,03$ est de 2 g, variation de masse rapidement atteinte pour des matériaux fortement saturés. La finalité de la relation (3-28) dans notre raisonnement consiste donc plutôt à comprendre les variations initiales des courbes de la Figure 3-56.

La Figure 3-56 confronte les deux modes d'évaluation du gonflement volumique des corps d'épreuve. A l'exception du matériau NR, on observe systématiquement l'existence d'une relation linéaire entre les deux modes d'estimation. Au delà d'un certain seuil de déformation, les points obtenus expérimentalement par suivis dimensionnel et massique décrivent une droite parallèle à la droite d'équation $y = x$ représentée par un trait pointillé (cf. Tableau 3-19). Ainsi, il semble que lors de la phase de gonflement intense du matériau, l'hypothèse de prise de masse par remplissage des fissures par l'eau est vérifiée. Ceci tend à confirmer nos premières conclusions issues de l'observation des relations entre déformations et prises de masse pour différentes réactions de gonflement.

Initialement, on observe que l'évaluation des déformations volumiques estimées sur la base des prises de masse est plus importante que celle escomptée à la lumière des déformations axiales : dans ce cas, l'hypothèse de prise de masse uniquement par remplissage des vides créés n'est pas vérifiée. Ceci implique une densification du matériau par remplissage des pores et donc des prises de masse par absorption capillaire. On notera par ailleurs que cette phase d'absorption capillaire apparaît être très courte dans le cas des corps d'épreuve R2_I-H30_GL_28. Devant la rapidité de développement des réactions de

gonflement, il est possible que la prise de masse par remplissage des fissures soit très rapidement prépondérante.

Le cas des éprouvettes R2_I_GLA_28 est remarquable : le comportement initial est comparable aux autres corps d'épreuve R2. Néanmoins, à un stade où une stabilisation est observée pour les autres corps d'épreuve, on mesure une poursuite importante des prises de masse tandis que les déformations sont quasiment stabilisées. En présence de KOH en quantité abondante dans la solution de stockage, il est probable que de nouveaux hydrates se forment à ce stade par mobilisation de potassium, entraînant la poursuite des prises de masse.

Les éprouvettes NR montrent une fois de plus un comportement singulier : si l'existence d'une relation linéaire entre les deux modes d'estimation des gonflements volumiques n'est pas remise en cause, la pente correspondante ne vérifie néanmoins pas l'hypothèse de remplissage par l'eau des fissures nouvellement formées. Ceci semble indiquer que, outre ce mécanisme de prise de masse, un autre phénomène entre en jeu pour cette formule de béton. La pente estimée est dans les deux cas supérieure à 1 (cf. Tableau 3-19). Par conséquent, la densité du matériau augmente plus vite que si les espaces poreux créés se remplissaient d'eau. Par conséquent on estime par cette méthode également (cf. Figure 3-54.a) que les vides du matériau sont globalement comblés au cours de l'expansion. Un remplissage des vides nouvellement créés par de l'ettringite pourrait expliquer ce phénomène. Par ailleurs, le changement de ciment pour cette formule de béton induisant des modifications de la nature de la pâte de ciment, il est possible que l'absorption capillaire soit plus marquée dans ce cas.

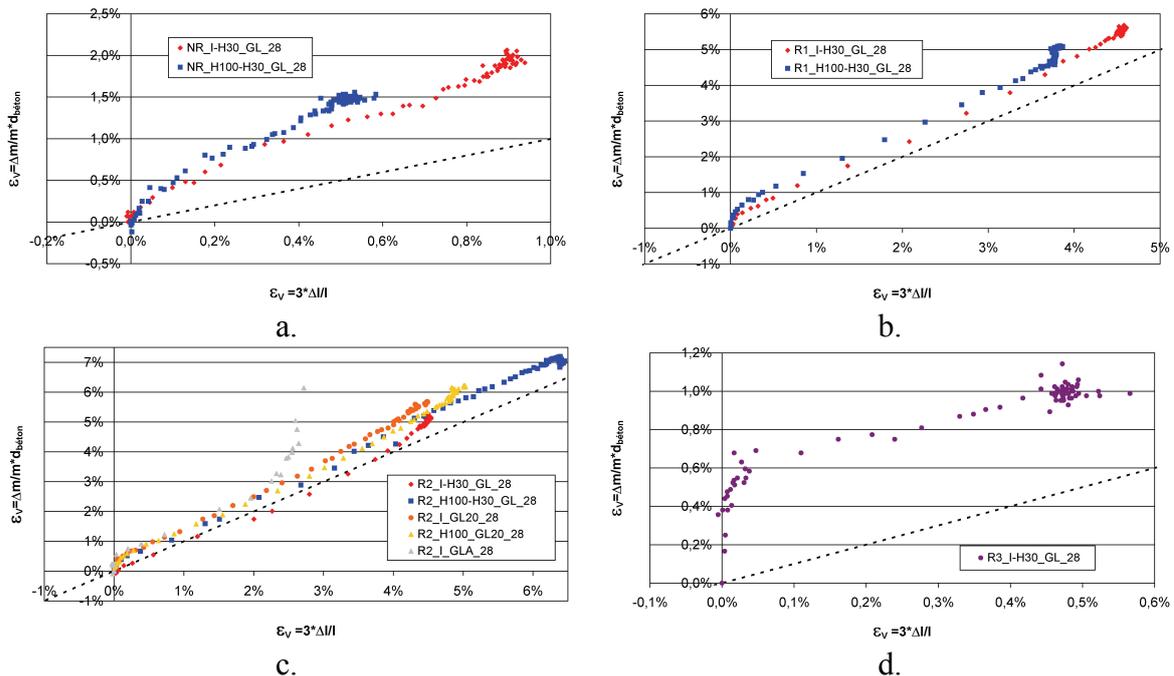


Figure 3-56 : confrontation des estimations de gonflement volumique à partir des gonflements axiaux et des prises de masse

a. Eprouvettes NR
c. Eprouvettes R2

b. Eprouvettes R1
d. Eprouvettes R3

Tableau 3-19 : paramètres de régression linéaire des courbes de gonflement volumique en phase 2

Formule	NR	NR	R1	R1	R2	R2	R2	R2	R2	R3
Condition de conservation	I-H30	H100-H30	I-H30	H100-H30	I-H30	H100-H30	I GL20	H100 GL 20	I GLA	I-H30
Échéance de carottage (j)	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28
Pente	1,565	2,218	1,144	1,075	0,961	1,122	1,144	1,123	0,999	0,870
Ordonnée à l'origine	0,392%	0,309%	0,195%	0,588%	-0,020%	0,109%	0,286%	0,230%	0,522%	0,582%
Coefficient de corrélation	0,988	0,986	0,999	1,000	0,996	0,998	0,999	0,998	0,999	0,979

Ainsi, ces deux calculs, basés sur des hypothèses différentes, conduisent à des conclusions complémentaires. Pour les bétons fortement expansifs tels que R1 et R2, les expansions semblent responsables de la création d'espaces poreux se remplissant d'eau pour l'essentiel. En revanche, la formule NR montre un comportement différent, traduisant probablement le remplissage des vides par les produits de réaction.

Finalement, ces investigations montrent qu'une analyse détaillée des variations massiques des corps d'épreuve en fonction de leur déformation peut fournir des éléments intéressants pour la compréhension des mécanismes d'action des RGI. L'analyse que nous avons menée semble montrer que, durant la phase de gonflement intense, la prise de masse est principalement le fruit d'une imbibition par remplissage des fissures tant dans le cas d'une RSI que dans le cas d'un couplage RSI-RAG. A ce stade, tout autre phénomène de prise de masse semble avoir des effets plus limités, échappant à la précision de nos techniques expérimentales. En revanche, en début d'essai, l'existence d'un autre mécanisme de prise de masse a pu être mis en évidence. Il s'agit probablement d'une part d'une absorption d'eau permettant la saturation du matériau d'une part et d'un remplissage des pores par l'ettringite jusqu'à un seuil de gonflement au delà duquel la fissuration commence à se développer.

8 Essais d'expansion résiduelle et expansion complète reconstituée

8.1 Quantification des expansions et estimation des paramètres

Afin de quantifier les effets de l'âge du carottage des corps d'épreuve sur les cinétiques et les amplitudes de gonflement, on réalise un calage des paramètres du modèle donné par l'équation (3-29) (ou l'équation (3-30) pour les corps d'épreuve R2 conservés à 100 % HR) sur les données expérimentales issues des essais d'expansion résiduelle (cf. Chapitre 2). Ce modèle est une adaptation du modèle de (*Brunetaud 2005*) pour lequel on réalise le changement de variable $t = t + t_{\text{offset}}$ afin de tenir compte des informations antérieures au suivi. On considère également une constante additive $\varepsilon_{\text{offset}}$ permettant de quantifier la part de gonflements déjà développés par le matériau au moment du carottage à 90 jours. Les opérations mathématiques sur le modèle de (*Brunetaud 2005*) sont illustrées par la Figure 3-57. Cette approche est similaire à celle développée pour la RAG par (*Li et al. 2004*) et (*Multon et al. 2008*).