

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*).

$$\varepsilon_{\text{résiduel}} = \varepsilon_{\infty} \frac{1 - \exp\left(-\frac{t + t_{\text{offset}}}{\tau_c}\right)}{1 + \exp\left(-\frac{t + t_{\text{offset}} - \tau_l}{\tau_c}\right)} \left(1 - \frac{\phi}{\delta + t + t_{\text{offset}}}\right) - \varepsilon_{\text{offset}} \quad (3-29)$$

$$\varepsilon_{\text{résiduel}} = \varepsilon_{\infty_RSI} \cdot \frac{1 - e^{-\left(\frac{t+t_{\text{offset}}}{\tau_{C_RSI}}\right)}}{1 + e^{-\left(\frac{t+t_{\text{offset}}-\tau_{L_RSI}}{\tau_{C_RSI}}\right)}} \cdot \left(1 - \frac{\phi}{\delta + t + t_{\text{offset}}}\right) + \varepsilon_{\infty_RAG} \cdot \frac{1 - e^{-\left(\frac{t+t_{\text{offset}}}{\tau_{C_RAG}}\right)}}{1 + e^{-\left(\frac{t+t_{\text{offset}}-\tau_{L_RAG}}{\tau_{C_RAG}}\right)}} - \varepsilon_{\text{offset}} \quad (3-30)$$

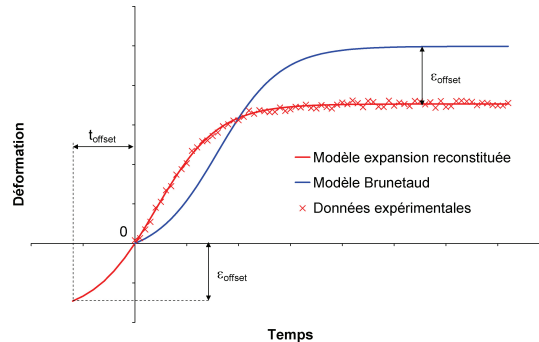


Figure 3-57 : adaptation du modèle de (Brunetaud 2005) à la description des essais d'expansion résiduelle

8.2 Cohérence des essais d'expansion résiduelle et des essais de gonflement libre

La Figure 3-58, la Figure 3-59 et la Figure 3-60 comparent l'évolution des déformations des corps d'éprouve carottés à 28 jours à celle des éprouvettes carottées à 90 jours conservés en eau et à 100 % HR après avoir effectué le changement de variable inverse à celui décrit en section 8.1. Les résultats des éprouvettes conservées sous scellement et à 30 % HR ne sont pas présentés ici de par leur absence de gonflements. Le modèle de gonflement libre des éprouvettes carottées à 90 jours est recalé sur le suivi de celles carottées à 28 jours en réalisant le changement de variable inverse de celui décrit en section 8.1. Le calage des paramètres des modèles est donné par le Tableau 3-20. On note que pour les formules réactives, en particulier R2 dont le temps de latence est faible, la valeur de la déformation $\varepsilon_{\text{offset}}$ correspond à une fraction plus significative de ε_{∞} , ce qui valide la représentativité de la situation fréquemment rencontrée sur les ouvrages atteints où sont effectués des essais d'expansion résiduelle une fois la RSI avérée.

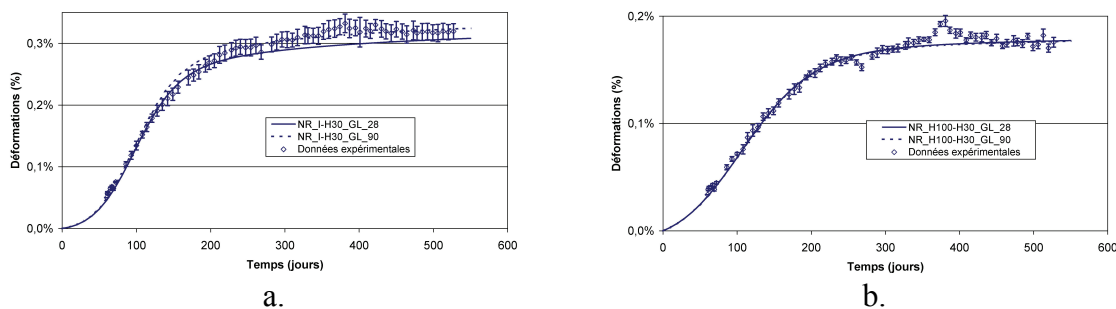


Figure 3-58 : comparaison des gonflements sur éprouvettes carottées à 28 jours et à 90 jours – formule NR – conservation en eau (a.) et à 100 % HR (b.)

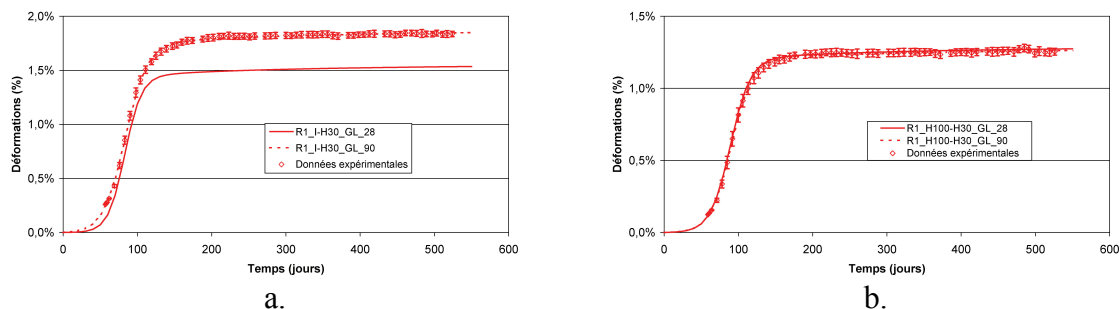


Figure 3-59 : comparaison des gonflements sur éprouvettes carottées à 28 jours et à 90 jours – formule R1 – conservation en eau (a.) et à 100 % HR (b.)

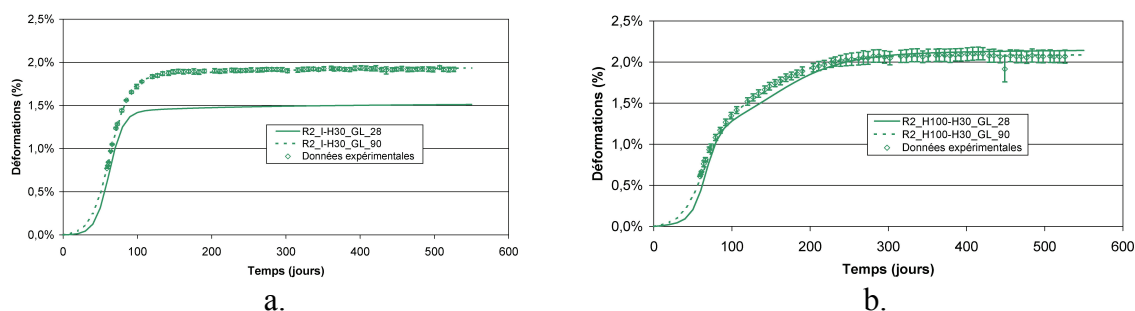


Figure 3-60 : comparaison des gonflements sur éprouvettes carottées à 28 jours et à 90 jours – formule R2 – conservation en eau (a.) et à 100 % HR (b.)

Tableau 3-20 : calage des paramètres des modèles de gonflement libre pour les éprouvettes carottées à 28 jours et 90 jours

Formule	NR	NR	NR	NR	R1	R1	R1	R1	R2	R2	R2	R2
Échéance de carottage (jours)	28	90	28	90	28	90	28	90	28	90	28	90
Conservation	I	I	H100	H100	I	I	H100	H100	I	I	H100	H100
ϵ_{∞_RSI}	0,34%	0,35%	0,19%	0,19%	1,58%	1,90%	1,31%	1,30%	1,55%	1,98%	1,24%	1,31%
τ_{C_RSI}	29	29	48	48	11	15	13	14	9	13	9	14
τ_{L_RSI}	92	92	100	100	83	83	89	90	62	63	66	64
ϕ	54	54	30	30	18	19	18	18	15	15	26	7
δ	84	84	88	88	120	120	120	120	120	120	119	121
ϵ_{∞_RAG}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,95%	0,79%
τ_{C_RAG}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	45	37
τ_{L_RAG}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	149	145
ϵ_{offset}	-	0,05%	-	0,03%	-	0,26%	-	0,12%	-	0,77%	-	0,61%
t_{offset}	-	60	-	60	-	57	-	59	-	59	-	62
$\epsilon_{carottage}$ (62 jours)	0,05%	-	0,03%	-	0,16%	-	0,12%	-	0,75%	-	0,50%	-

Pour le cas de la conservation en eau, ces résultats montrent d’une manière systématique des gonflements d’amplitude plus importante pour les corps d’épreuve carottés à 90 jours que pour ceux carottés à 28 jours. En revanche, l’échéance de carottage ne semble pas avoir d’influence très marquée sur les cinétiques de gonflement dans ces conditions (paramètres τ_c et τ_l équivalents).

Le cas des éprouvettes conservées à 100 % HR ne révèle pas d'écart notable entre les corps d'épreuve carottés à 28 jours et ceux carottés à 90 jours : il semble que dans ces conditions, les gonflements se développent de manière quasi-identique dans les deux cas.

La comparaison de $\varepsilon_{\text{offset}}$ (valeur obtenue numériquement lors du calage des paramètres de la relation (3-30) sur les données expérimentales par la méthode des moindres carrés) et $\varepsilon_{\text{carottage}}$ (valeur de déformation mesurée pour les cylindres carottés à 28 jours) montre que ces valeurs sont très proches. De même, la valeur de t_{offset} est systématiquement très proche de 62 jours, durée correspondant à la période réelle de stockage de chaque bloc dans des conditions de conservation identiques aux cylindres de gonflement libre correspondants. Ceci semble donc indiquer que les réactions de gonflement se sont déroulées de manière similaire dans les blocs et dans les cylindres. Ainsi, cette démarche expérimentale permet de reconstituer une courbe d'expansion complète et donc de disposer de l'ensemble des paramètres décrivant le comportement expansif du matériau étudié une fois la réaction avérée. Ceci valide ainsi la démarche de re-calcul mise en œuvre par (Fasseu & Mahut 2003, Li et al. 2004, Baghdadi 2008).

8.3 Interprétations

Pour expliquer les différences d'amplitudes de déformation lorsque l'essai d'expansion résiduelle est réalisé en eau, l'hypothèse d'avancements de réactions différents entre les blocs et les éprouvettes au moment du carottage à 90 jours ne semble pas pertinente étant donné les résultats issus de la comparaison des cinétiques et des amplitudes de gonflement. Plusieurs éléments peuvent être avancés pour expliquer les amplitudes de gonflement supérieures des éprouvettes carottées à 90 jours et conservées en eau :

- Effets d'un relâchement de contraintes au carottage :

Un relâchement de contraintes au moment du carottage pourrait expliquer cette différence d'amplitude de gonflements : suite au carottage des cylindres, le matériau pourrait se trouver libéré d'une potentielle contrainte de confinement qui lui était appliquée au sein du bloc et ainsi développer des gonflements plus importants. Si cette explication semble plausible, elle n'est pas pour autant satisfaisante : en effet, dans cette éventualité, cette différence d'amplitude de déformation se retrouverait également pour les corps d'épreuve conservés à 100 % HR, ce qui n'est pas le cas.

- Effets d'une microfissuration de surface lors du carottage :

Le carottage des corps d'épreuve peut induire une microfissuration de surface du matériau et ainsi faciliter la précipitation d'ettringite (Fu et al. 1994-b) à un stade d'avancement de la réaction plus propice à la formation de cristaux (60 jours de latence sont écoulés). Néanmoins, la méthode de préparation des corps d'épreuve a été identique pour les éprouvettes conservées en eau et à 100 % HR. Un tel effet devrait donc se faire ressentir dans les deux cas ce qui n'est pas observé.

- Lixiviation des alcalins :

Lors de la phase de stockage des blocs et des cylindres carottés à 28 jours, les cinétiques de lixiviation des alcalins pour les corps d'épreuve immergés sont potentiellement différentes de par les dimensions des deux types d'éléments. Ainsi, la lixiviation est probablement moins avancée dans les blocs (du moins à cœur) que dans les

cylindres : la RSI serait alors retardée avant carottage pour les éprouvettes prélevées à 90 jours. On mesurerait ainsi la quasi-totalité du gonflement lors de l'essai d'expansion résiduelle. Ceci impliquerait également un biais dans la détermination de $\varepsilon_{\text{offset}}$ qui devrait être plus faible que $\varepsilon_{\text{carottage}}$ pour expliquer le comportement des cylindres d'expansion résiduelle.

Pour les corps d'épreuve conservés à 100 % HR, cette différence de lixiviation est probablement bien moindre, l'eau liquide étant présente en moins grande quantité dans ce cas. Ainsi, les différences de cinétique et d'amplitude d'expansion préalablement au carottage des cylindres d'expansion résiduelle sont certainement moindres.

Toutefois, il paraît difficile à l'heure actuelle d'expliquer ces différences d'amplitudes de gonflements constatées sur la base de ces seuls éléments. En l'absence d'essais complémentaires, il paraît difficile d'apporter des explications plus poussées à ces différences.

Le mode opératoire des essais d'expansion résiduelle de RSI défini par (*Pavoine & Divet 2009*) prévoit la réalisation d'essais en eau. A la lumière de nos résultats, il semble que la réalisation de telles investigations conduise à l'obtention de résultats conservatifs : le potentiel de gonflement résiduel estimé peut être très largement supérieur à celui développé par le matériau dans la réalité. Si en termes de sécurité ceci est plutôt positif, en termes de pertinence de l'essai, une telle surévaluation peut conduire à des écarts importants des résultats de modèles prédictifs par rapport à la réalité directement imputable à un biais de la donnée d'entrée que peut constituer l'essai d'expansion résiduelle. Par conséquent, la réalisation d'un essai d'expansion résiduelle dans une atmosphère à 100 % HR pourrait se révéler plus adaptée au re-calcul de structures, à l'instar de l'essai d'expansion résiduelle de RAG proposé par (*Fasseu 1997*). Une solution alternative consisterait à utiliser l'essai d'expansion résiduelle comme outil de diagnostic mais à considérer un essai d'expansion sur béton reconstitué (composition et traitement thermique) à 100 % HR pour le re-calcul fournissant une courbe d'expansion complète pouvant être utilisée comme donnée d'entrée dans des modèles tels que celui de (*Baghdadi 2008*).

9 Influence du mode de préparation des corps d'épreuve

9.1 Carottage et moulage

Dans le programme expérimental de cette recherche, certains suivis dimensionnels sont réalisés sur des corps d'épreuve moulés (éprouvettes de caractérisation mécanique testées à deux ans et éprouvettes de caractérisation de la lixiviation en phase de stockage) et d'autres sur des corps d'épreuve carottés (essais de gonflement libre). Cette section compare les résultats correspondant à des corps d'épreuve préparés par ces deux techniques et conservés dans des conditions hydriques identiques, lorsque l'analogie est possible.

La Figure 3-61 compare les évolutions dimensionnelles et massiques des éprouvettes moulées et carottées conservées en eau. On constate systématiquement des amplitudes et des cinétiques de gonflement moins importantes pour les corps d'épreuve moulés (cf. Tableau 3-21). Tous ces corps d'épreuve ont été fabriqués de manière simultanée. Ainsi, ils disposent a priori d'un même potentiel de réactivité d'un point de vue

chimique et thermique. Par ailleurs, leurs modes de conservation sont identiques. Ces différences de gonflement ne sont donc pas à rechercher à ce niveau.

Trois facteurs semblent pouvoir être responsables de ces différences. Premièrement, les méthodes de vibration du béton pour la préparation des corps d'épreuve ont été différentes : les éprouvettes moulées (pour essais de caractérisation mécanique) ont été mises en œuvre à l'aide d'une table vibrante (*AFNOR 1981-a*) tandis que les blocs de carottage des cylindres de gonflement libre ont été vibrés à l'aiguille suivant une technique similaire à (*AFNOR 1981-b*). Ces deux méthodes peuvent induire des différences de porosité. En particulier, une vibration à l'aiguille se révèle être moins maîtrisable qu'une vibration à la table (caractérisée par la mesure du temps d'application de la vibration) et a pu être appliquée sur une durée plus importante. A la lumière de l'étude bibliographique du Chapitre 1, il apparaît possible qu'une variation de la porosité ait conduit à ces différences de comportement expansif. En outre, la plus grande fluidité de la formule NR induit un risque de ségrégation plus important également responsable d'hétérogénéité du matériau.

Deuxièmement, le carottage peut être responsable d'une part d'une microfissuration de surface pouvant faciliter la pénétration d'eau dans le matériau ou bien encore fournir des sites potentiels de précipitation de l'ettringite (*Fu et al.1994*), même si dans ce cas, ces cristaux d'ettringite pourraient ne pas avoir d'effet expansifs (*Scherer 1999, Scherer 2004*).

Troisièmement, si les éprouvettes carottées présentent une répartition homogène des granulats en surface de par leur mode de préparation, ceci n'est pas le cas pour les éprouvettes moulées : il existe un effet de paroi lors du coulage des corps d'épreuve dans les moules induisant alors une moins forte concentration en gros granulats en surface qu'à cœur (*Sedran & de Larrard 1994*). Ceci peut avoir une influence notable, pour le cas de la RAG notamment (*Larive 1998*).

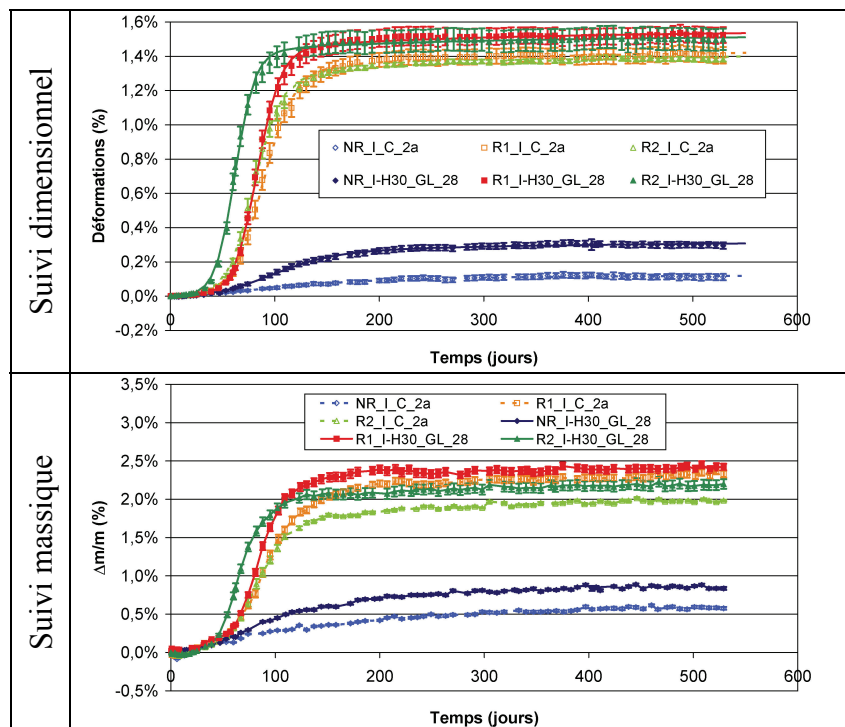


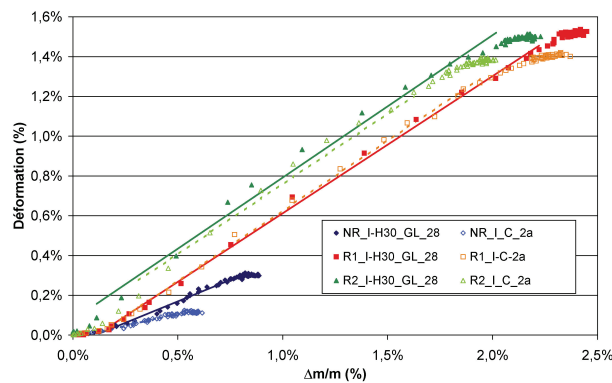
Figure 3-61 : comparaison des suivis dimensionnels et massiques des éprouvettes moulées et carottées – conservation en eau

Tableau 3-21 : calage des paramètres des modèles de gonflement libre pour les éprouvettes carottées et moulées

Formule	NR	NR*	R1	R1	R2	R2
Conservation	Immergé	Immergé	Immergé	Immergé	Immergé	Immergé
Préparation	Carotté	Moulé	Carotté	Moulé	Carotté	Moulé
ε_{∞}	0,34%	0,13%	1,58%	1,47%	1,55%	1,46%
τ_C (jours)	29	60	11	15	9	13
τ_L (jours)	92	58	83	88	62	79
ϕ (jours)	54	62	18	25	15	31
δ (jours)	84	106	120	144	120	143

* les faibles cinétiques de déformation sur ces corps d'épreuve rendent difficile le calage des paramètres du modèle

La Figure 3-62 représente l'évolution des dimensions en fonction des variations de masse pour chaque mode de préparation. Pour les formules R1 et R2, on observe des comportements hydriques similaires (cf. pentes de régression, Tableau 3-22). En revanche, les pentes sont différentes pour les éprouvettes NR_I-H30_GL_28 et NR_I_C_2a, traduisant ainsi un comportement hydrique différent.

**Figure 3-62 : suivi des déformations en fonction des variations relatives de masse – éprouvettes immergées****Tableau 3-22 : régressions linéaires entre déformations et variations de masse – éprouvettes carottées et moulées – conservation en eau**

	Pente	Ordonnée à l'origine	Coefficient de corrélation
NR_I-H30_GL_28	0,4315	-0,046%	0,9947
NR_I_C_2a	0,2474	-0,015%	0,9808
R1_I-H30_GL_28	0,6895	-0,077%	0,9992
R1_I_C_2a	0,7067	-0,082%	0,9989
R2_I-H30_GL_28	0,7158	0,076%	0,9936
R2_I_C_2a	0,7055	0,055%	0,9952

La Figure 3-63 confronte les estimations de gonflement volumique obtenues à l'aide des déformations axiales et des prises de masse (cf. section 7.2). Pour les formules R1 et R2, ces investigations confirment un comportement hydrique équivalent : la part d'eau mobilisée par absorption capillaire apparaît tout à fait comparable tout comme le seuil de déformation au delà duquel l'hypothèse de prise de masse par remplissage des fissures est vérifiée. Ainsi, malgré des cinétiques et des amplitudes d'expansion différentes, il semble que les mécanismes d'expansion soient équivalents. La part de prise de masse par absorption capillaire étant comparable entre les différents mode de

préparation des corps d'épreuve, il nous semble moins probable qu'une microfissuration liée au carottage soit responsable de ces différences de comportement expansif : dans le cas contraire, la part d'eau imputable à l'absorption capillaire serait probablement plus importante pour les éprouvettes carottées.

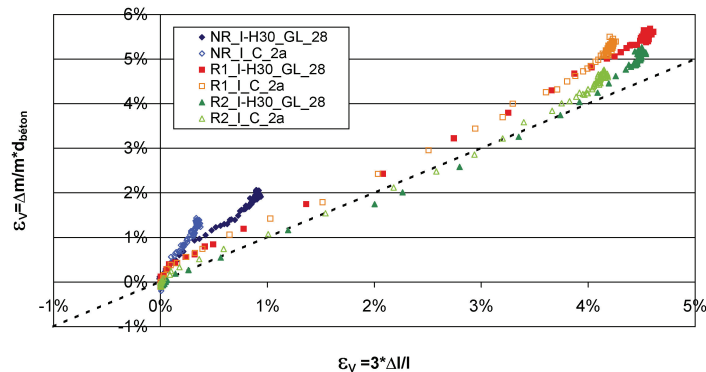


Figure 3-63 : confrontation des estimations de gonflement volumique à partir des gonflements axiaux et des prises de masse – éprouvettes moulées et carottées

Le cas du matériau NR est une fois de plus remarquable. En particulier, on observe un comportement hydrique différent pour les corps d'épreuve moulés et carottés. En se basant sur le raisonnement de (*Meland et al. 1997*), la pente plus importante observée dans le cas des éprouvettes moulées peut indiquer une plus grande contribution de la prise de masse par absorption capillaire. En l'absence d'investigations complémentaires, il apparaît délicat d'apporter une explication pertinente à ce phénomène.

Au total, les différentes techniques de fabrication des corps d'épreuve de gonflement libre conduisent à l'évaluation de cinétiques et d'amplitudes de gonflements différentes. Ceci induit un impact certain sur la validation des formules de bétons vis-à-vis du risque de RSI ainsi que sur les méthodes de diagnostic de la pathologie et de détermination des données d'entrée utiles aux méthodes de re-calcul. En particulier, si on considère que la principale cause de différence de gonflement entre ces corps d'épreuve provient d'une différence de porosité et/ou de microfissuration, il convient d'utiliser des corps d'épreuve dont les techniques de mises en œuvre sont les plus proches possibles du matériau *in situ* que l'on étudie. Par exemple, l'utilisation d'éprouvettes moulées vibrées selon des procédés normalisés semble pouvoir conduire à une sous-évaluation du potentiel de gonflement du matériau. L'utilisation de corps d'épreuve carottés sur des éléments mis en œuvre de manière similaire aux procédés de chantier pourrait conduire à des estimations plus réalistes. En tout état de cause, l'utilisation d'essais de gonflements sur des éprouvettes carottées semble conduire à des résultats plus sécuritaires.

Un des moyens pour estimer la pertinence de ces considérations serait d'appliquer une méthode de re-calcul en utilisant comme donnée d'entrée une courbe de gonflement déterminée à l'aide de cylindres moulés et une autre à l'aide de cylindres carottés. Les données issues de ce programme expérimental devraient permettre d'apporter des réponses à ces questions.

9.2 Répétabilité de fabrication

La Figure 3-64 compare les suivis dimensionnels et massiques des éprouvettes I_C_2a et I_38_L pour les formules R1 et R2. Dans les deux cas, les corps d'épreuve sont

des cylindres moulés. Néanmoins, ils ont été fabriqués au cours de coulages différents (cf. Chapitre 2). Les corps d'épreuve R2 et R1_I_C_2a ont été fabriqués dans un même malaxeur. En revanche, les corps d'épreuve R1_I_38_L ont été fabriqués à l'aide d'un malaxeur de 30 litres.

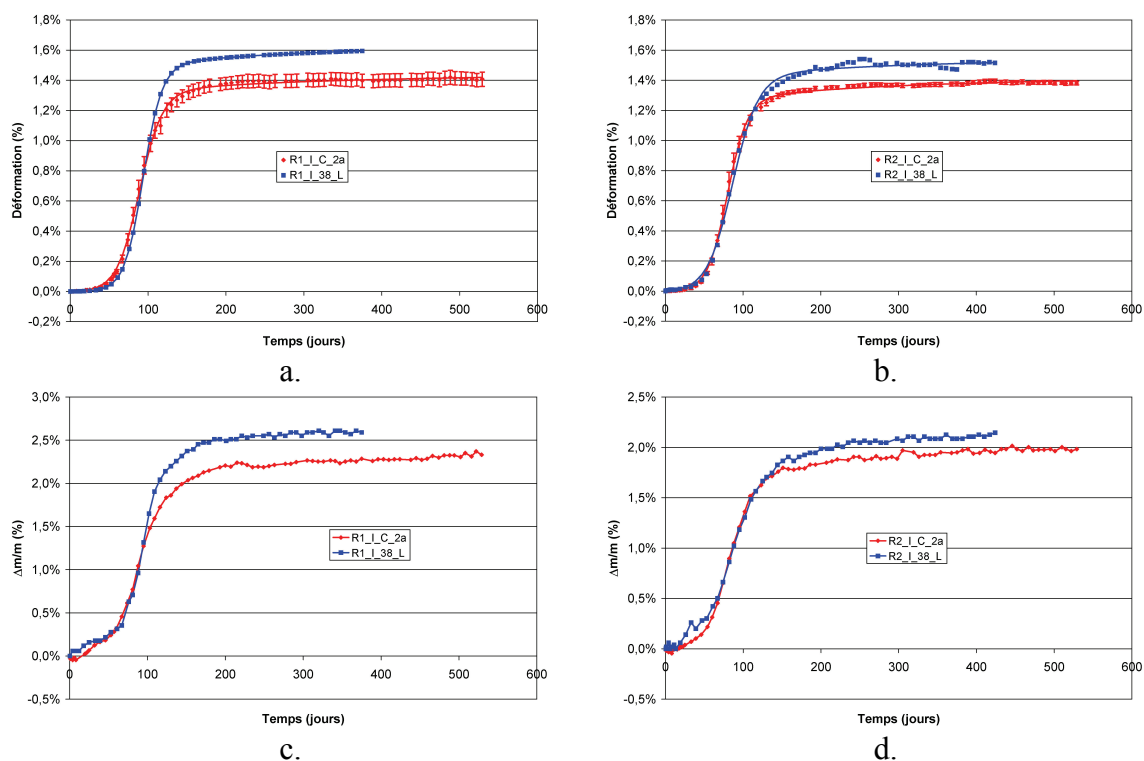


Figure 3-64 : comparaison des suivis dimensionnels et massique des éprouvettes moulées pour caractérisation mécanique et pour quantification de la lixiviation des alcalins – conservation en eau
 a. Suivi dimensionnel – formule R1
 b. Suivi dimensionnel – formule R2
 c. Suivi massique – formule R1
 d. Suivi massique – formule R2

Tableau 3-23 : calage des paramètres des modèles de gonflement libre pour les éprouvettes carottées et moulées

	R1_I_C_2a	R1_I_38_L	R2_I_C_2a	R2_I_38_L
ϵ_{∞}	1,47%	1,68%	1,46%	1,58%
τ_C (jours)	15	12	13	16
τ_L (jours)	88	93	79	86
ϕ (jours)	25	24	31	22
δ (jours)	144	118	143	120

Si les paramètres cinétiques restent relativement proches, on observe toutefois des différences d'amplitude significatives (cf. Tableau 3-23). Pour la formule R1, cette différence pourrait s'expliquer par un matériau aux propriétés différentes du fait de l'utilisation d'un malaxeur distinct pour les deux types de corps d'épreuve : les vitesses de malaxage sont en effet différentes ce qui conduit à un brassage différent. Les essais sur béton frais ont mis en évidence un affaissement moins important pour les éprouvettes R1_I_38_L mais des teneurs en air occlus similaires. Néanmoins, les corps d'épreuve R2 font état d'une différence d'amplitude non négligeable (de l'ordre de 0,1 %) bien qu'ils aient été gâchés dans des conditions similaires. Par ailleurs, la confrontation des gonflements volumiques obtenus à l'aide des déformations axiales et des prises de masse (cf. Figure 3-65) montre des comportements tout à fait similaires bien que les expansions

différent (cf. Tableau 3-24). Une différence de mode de préparation ne peut donc expliquer à elle seule ces différences d'expansion.

Il est possible que les variations de composition cimentaire inévitables (même dans un échantillon de ciment de volume relativement restreint tel que celui que nous avons utilisé) ait un impact. Ainsi, (Multon 2004) montre que l'analyse de 10 sacs de ciment conduit à évaluer une incertitude sur la teneur en alcalins d'une valeur de $0,92 \% \pm 0,05 \%$. Si cette valeur ne semble pas considérable dans l'absolu, elle peut représenter néanmoins une variation suffisante pour expliquer, au moins en partie, les variations de gonflements mesurés. Ainsi, une telle variabilité conduit à des teneurs en alcalins comprises entre 3,57 et 3,98 kg/m^3 dans le béton. Si de telles variations sont observées pour les alcalins, il est probable qu'il en soit de même pour d'autres composants tels que les aluminates ou les sulfates. Ceci peut donc influencer sur la quantité d'ettringite formée dans le matériau et donc potentiellement induire des différences de comportement expansif. Afin de s'assurer de la représentativité statistique de ces résultats, il conviendrait de réaliser une étude en multipliant les essais de répétabilité et en étudiant la dispersion des résultats dans ce contexte.

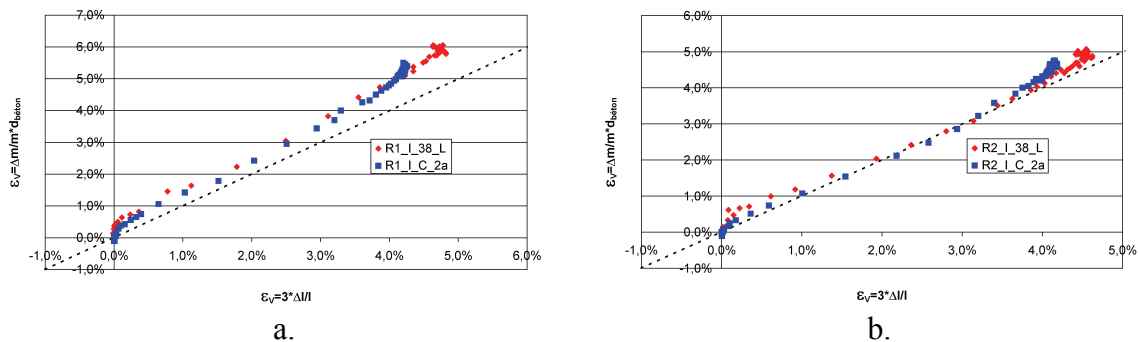


Figure 3-65 : confrontation des estimations de gonflement volumique à partir des gonflements axiaux et des prises de masse – répétabilité de fabrication (a. formule R1 ; b. formule R2)

Tableau 3-24 : paramètres de régression linéaire des courbes de gonflement volumique – répétabilité de fabrication

	R1_I_38_L	R1_I_C_2a	R2_I_38_L	R2_I_C_2a
Pente	1,122	1,103	0,955	1,042
Ordonnée à l'origine	0,394%	0,254%	0,278%	0,002%
Coefficient de corrélation	0,998	0,998	0,996	0,995

10 Effets d'une humidification ou d'un séchage tardifs

10.1 Cas de la réaction sulfatique interne

10.1.1 Effets d'un séchage tardif

10.1.1.1 Eprouvettes de gonflement libre

La Figure 3-66 représente les suivis dimensionnel et massique des éprouvettes initialement soumises à un apport d'eau puis séchées dans une atmosphère à 30 % HR. Le trait vertical pointillé correspond à l'instant du basculement des conditions de conservation. A la lumière de ces résultats, les déformations de RSI apparaissent fortement chimiquement irréversibles, à l'instar des conclusions de (Multon 2004) sur la RAG. On

observe logiquement un retrait de séchage accompagné d'une perte de masse rapide. Cette dernière semble se stabiliser autour d'une valeur de -3,5 % à comparer aux -4 % des éprouvettes séchées lors de la phase 1. Cette différence pourrait s'expliquer potentiellement par une mobilisation de l'eau pour la formation d'ettringite. L'étude bibliographique du Chapitre 1 a en effet montré que les molécules d'eau contenues dans les cristaux d'ettringite sont plus ou moins facilement « évacuables » en fonction de leur position dans la structure cristalline (*Scrivener et al. 1999*).

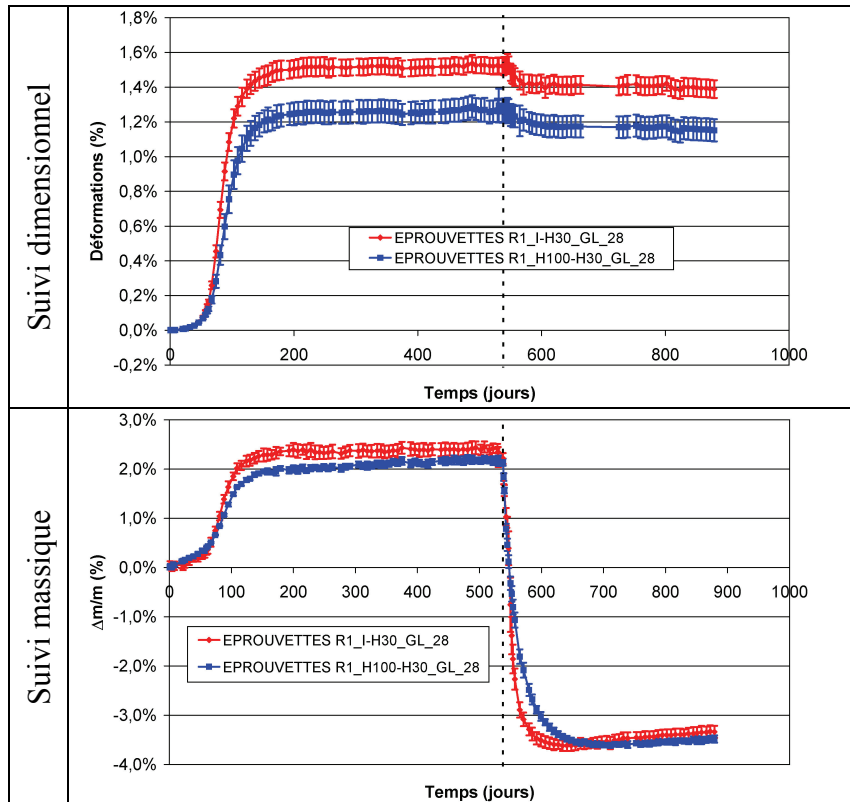


Figure 3-66 : suivis dimensionnels et massiques – éprouvettes R1 – séchage tardif à 30 % HR

La Figure 3-67 compare les déformations de retrait et les pertes de masse des éprouvettes R1_H30-I_GL_28 (i.e. les éprouvettes séchées après 28 jours de cure sous aluminium) et celles des éprouvettes R1_I-H30_GL_28 et R1_H100-H30_GL_28. Dans ce dernier cas, un recalage des mesures a été opéré en considérant comme référence la dernière valeur mesurée avant changement des conditions hydriques. Les pertes relatives de masse sont plus élevées. Ceci semble logique : outre les modifications de comportement hydrique induites par le développement de la RSI, les matériaux sont très probablement proches de la saturation au moment du changement de condition hydrique et disposent donc d'une réserve d'eau « à perdre » plus importante que pour les corps d'épreuve séchés lors de la première phase. De plus, la modification de la porosité du matériau à l'issue des expansions explique également ces écarts de perte de masse.

Pour les corps d'épreuve R1_I-H30_GL_28 et R1_H100-H30_GL_28, on observe que le retrait n'est pas immédiat lors du basculement des conditions de conservation : durant une dizaine de jours les dimensions des éprouvettes restent stables. Ceci peut s'expliquer potentiellement par une poursuite des gonflements à cœur en parallèle du retrait en surface : tant que le front de séchage n'a pas affecté une portion de matériau suffisamment importante, retrait et expansion se compensent. Par la suite, les déformations de retrait sont plus importantes dans le cas d'un séchage tardif. Elles sont de l'ordre de -0,1 % après environ 100 jours de séchage contre une valeur d'environ -0,03 % pour les

matériaux initialement séchés. Ces différences de retrait peuvent trouver deux explications : elles peuvent provenir soit d'une modification du comportement mécanique du matériau vis-à-vis de la dessiccation (évolution du coefficient de contraction hydrique), soit de la perte de masse plus importante subie par des corps d'épreuve initialement humidifiés.

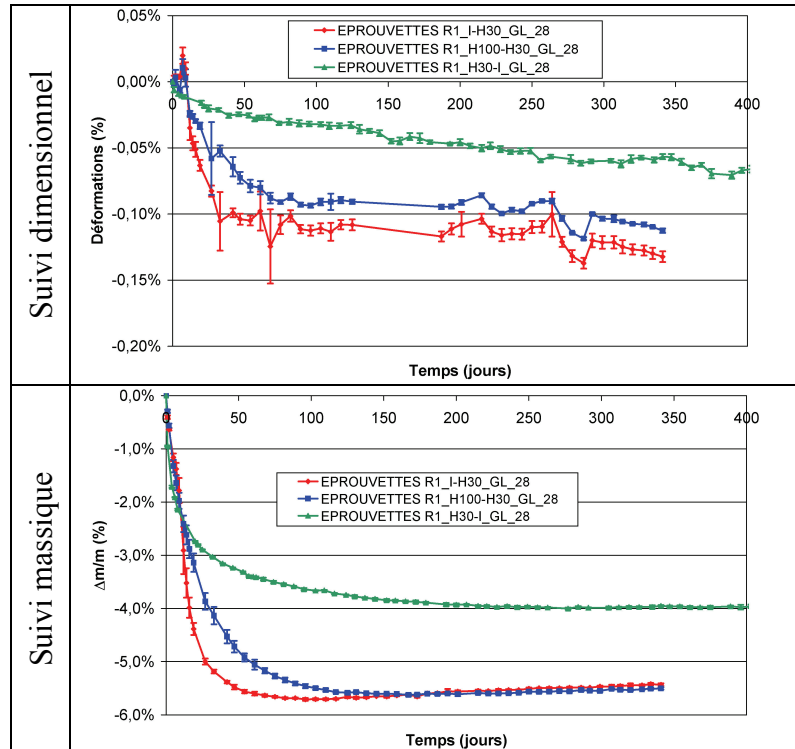


Figure 3-67 : comparaison des déformations de retrait et des pertes de masse après 28 jours de cure sous aluminium et lors du séchage tardif

La Figure 3-68 représente la relation existant entre la déformation de retrait et la perte de masse d'une couronne de béton de 2 cm d'épaisseur située en surface des corps d'épreuve (méthodologie de calcul présentée en section 3.2). Conformément aux observations issues de la Figure 3-67, on ne détecte pas dans ce cas une première partie linéaire de pente positive correspondant à une fissuration de surface liée à un retrait empêché (*Granger et al. 1997-b*). Il est possible que les dégradations imposées par le développement de RSI lors de la première phase des expérimentations autorisent dans ce cas un retrait libre en surface. La pente de la courbe semble dans ce cas proche de zéro.

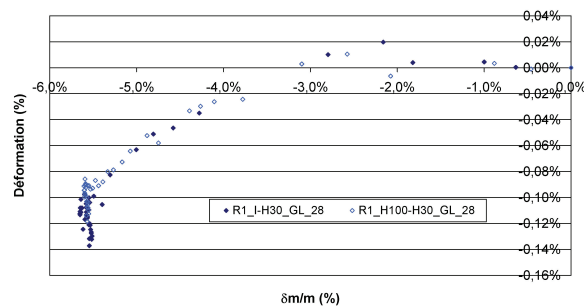


Figure 3-68 : déformation de retrait mesurée en fonction de la variation relative de masse d'une couronne de béton de 2 cm d'épaisseur – éprouvettes R1_I-H30_GL_28 et R1_H100-H30_GL_28 – recalage à l'instant du séchage tardif

Par la suite, on détecte une phase de comportement linéaire des déformations par rapport aux pertes de masse. Celle-ci semble correspondre au cas où les déformations de retrait sont pilotées par la perte de masse du cœur de l'éprouvette (*Granger et al. 1997-b*). Selon ces considérations, cette partie de la courbe est caractéristique du comportement du matériau vis-à-vis du retrait de séchage. Une comparaison de la pente de cette courbe à celle correspondant au cas d'un séchage initial du matériau doit donc permettre de conclure ou non à une modification du comportement du béton vis-à-vis de la dessiccation.

Afin de rendre comparables les résultats issus des différentes phases des expérimentations, les évolutions massiques ont été normées : à chaque instant, on confronte les déformations mesurées au ratio entre la perte de masse correspondante et la perte de masse asymptotique de la couronne de béton extérieure de 20 mm d'épaisseur. Cette opération est nécessaire, les pertes de masse asymptotiques étant fonction des états hydriques initiaux qui diffèrent selon la phase expérimentale considérée. Ainsi, la pente déterminée à l'aide de ces données correspond au taux de déformation subi par le matériau afin d'atteindre le niveau asymptotique de perte de masse.

La Figure 3-69 représente l'évolution des déformations de retrait en fonction des variations relatives de masse normées pour les corps d'épreuve de formule R1 séchés à 30 % HR. Le Tableau 3-25 synthétise les paramètres de régression linéaire pour ces cas de figure. Si les pentes correspondant aux corps d'épreuve R1_I-H30_GL_28 et R1_H100-H30_GL_28 sont comparables, on note une différence significative entre ces éprouvettes et les cylindres R1_H30-I_GL_28.

Ceci semble donc confirmer que les différences de déformation de retrait observées sont le fruit d'une modification du comportement mécanique du matériau vis-à-vis de la dessiccation. En particulier, la pente plus élevée dans le cas d'un séchage tardif indique que pour une perte de masse donnée, la déformation de retrait résultante est plus importante. Cette observation est cohérente avec une augmentation du volume des pores rendant le matériau « plus souple ».

Ainsi, le développement de la RSI semble avoir modifié le comportement mécanique du matériau vis-à-vis du retrait de dessiccation. Ceci est cohérent avec l'histoire du matériau : les gonflements importants observés lors de la phase 1 ont conduit au développement d'une fissuration conséquente responsable d'une évolution des caractéristiques mécaniques. Cette conclusion constitue une différence significative par rapport à l'étude de la RAG par (*Multon 2004*) qui n'a révélé aucune modification sensible du mécanisme de retrait de dessiccation suite au développement d'une RAG.

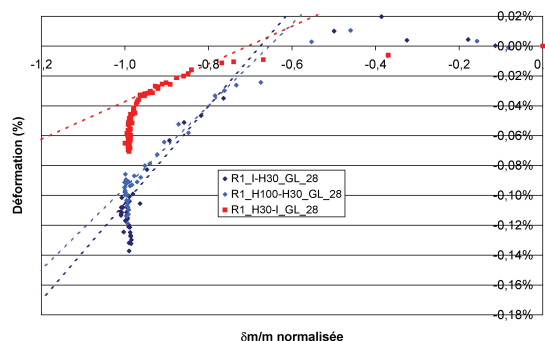


Figure 3-69 : déformation de retrait mesurée en fonction de la variation relative de masse normée d'une couronne de béton de 2 cm d'épaisseur – formule R1 – séchage à 30 % HR

Tableau 3-25 : paramètres de régression linéaire de la relation déformation / variation relative de masse normée – formule R1 – séchage à 30 % HR

	R1_I-H30_GL_28	R1_H100-H30_GL_28	R1_H30-I_GL_28
Pente	0,0032	0,0027	0,0013
Ordonnée à l'origine	0,2192%	0,1481%	0,0892%
Corrélation	0,961	0,989	0,972

10.1.1.2 Influence de l'histoire du matériau : effets de l'échéance de carottage

Les corps d'épreuve mis en œuvre lors de la première phase des expérimentations pour la réalisation d'essais d'expansion résiduelle ont également été soumis à une modification des conditions d'exposition à l'humidité. Ce basculement a été opéré à la même échéance que pour les éprouvettes de gonflement libre (soit après 476 jours de suivi = 538 – 62 jours).

La Figure 3-70 confronte les suivis dimensionnels et massiques des éprouvettes R1 carottées à 28 jours et 90 jours et soumises à un séchage tardif. Les comportements vis-à-vis du retrait se révèlent tout à fait comparables. Ceci est confirmé par l'existence de relations linéaires entre déformations et variations relatives de masse de la couronne extérieure de béton de pentes similaires (cf. Figure 3-71 et Tableau 3-26 – on notera que l'établissement de la régression linéaire pour les éprouvettes R1_I-H30_GL_90 s'est révélé délicat en raison du comportement particulier observé au début du retrait). Ainsi, l'échéance de carottage et les différences de comportement expansif correspondantes (cf. section 8) ne semblent pas avoir d'influence notable sur le comportement du matériau vis-à-vis du retrait de dessiccation lors d'un séchage tardif.

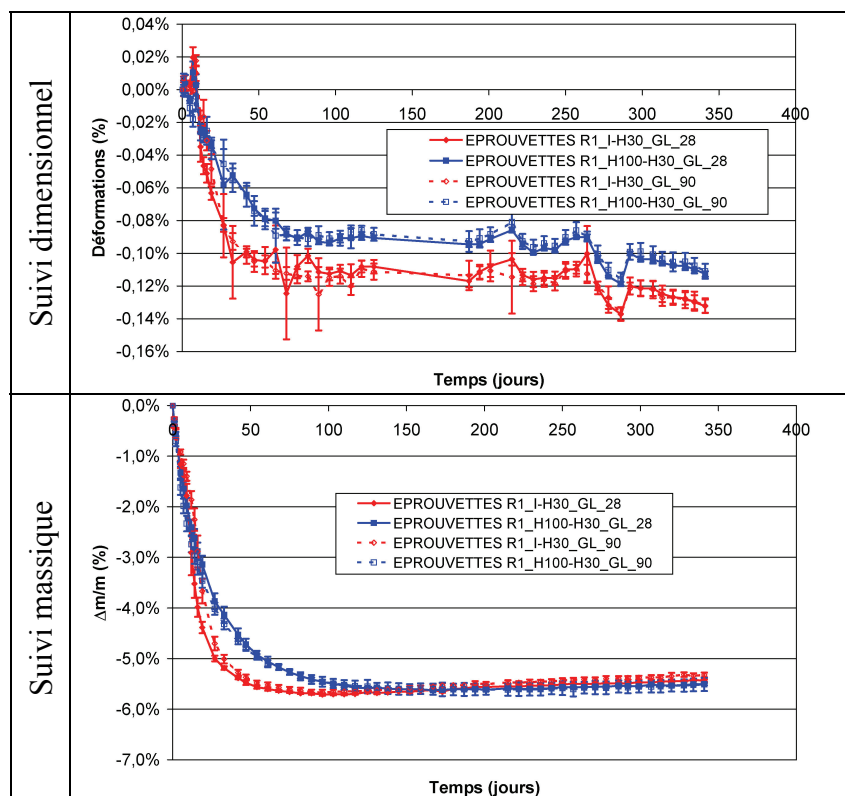


Figure 3-70 : comparaison des suivis dimensionnels et massiques après recalage à l'instant de basculement des conditions d'exposition – formule R1 – carottage à 28 jours ou 90 jours

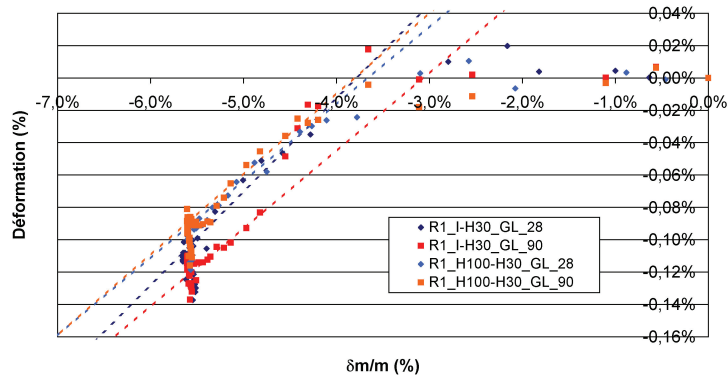


Figure 3-71 : déformation de retrait mesurée en fonction de la variation relative de masse normée d'une couronne de béton de 2 cm d'épaisseur – formule R1 – carottage à 28 jours et 90 jours

Tableau 3-26 : paramètres de régression linéaire de la relation déformation / variation relative de masse – formule R1 – carottage à 28 jours ou 90 jours

	R1_I-H30_GL_28	R1_I-H30_GL_90	R1_H100-H30_GL_28	R1_H100-H30_GL_90
Pente	0,0576	0,0483	0,0477	0,0498
Ordonnée à l'origine	0,2181%	0,1481%	0,1748%	0,1896%
R ²	0,901	0,978	0,965	0,952

10.1.1.3 Conclusions

Le développement de la RSI préalablement à un séchage du matériau conduit donc à des déformations chimiquement irréversibles d'une part et à une modification du comportement hydrique d'autre part (augmentation du coefficient de contraction hydrique et du volume d'eau dans le matériau à la saturation). Cette caractéristique induit (probablement) une complexité supplémentaire pour la mise en œuvre des méthodes de recalcul : ces dernières utilisent essentiellement pour données d'entrée les caractéristiques de gonflement, l'évolution temporelle du champ de teneur en eau et l'évolution thermique du matériau (e.g. [Li et al. 2004] ou [Baghdadi 2008]). Dans le cas d'une altération mécanique ne modifiant pas les propriétés de transfert (comme l'a montré [Multon 2004] pour la RAG), le calcul hydrique de la structure peut être effectué de manière découplée par rapport au calcul mécanique. En revanche, la RSI modifiant les propriétés de transfert hydrique, il est probable qu'un couplage entre le calcul mécanique et le calcul de diffusion hydrique se révèle nécessaire. Ceci est d'autant plus vrai que cette réaction présente un fort couplage avec l'humidité : le développement des expansions est ainsi fortement tributaire de la cartographie hydrique des structures.

10.1.2 Effets d'une humidification tardive

10.1.2.1 Eprouvettes de gonflement libre

La Figure 3-72 représente les évolutions dimensionnelle et massique des échantillons de gonflement libre soumis à une humidification tardive par immersion. Le trait vertical pointillé correspond à l'instant du basculement des conditions de conservation. La Figure 3-73 et la Figure 3-74 représentent les suivis dimensionnels des corps d'épreuve après recalage à l'instant de basculement des conditions de conservation.

Le Tableau 3-27 synthétise les paramètres de modélisation des gonflements libres correspondants.

Pour les éprouvettes initialement scellées, on observe un démarrage quasi-instantané des gonflements (0,1 % en moins de 30 jours de remouillage) qui atteignent environ 1,4 % en 140 jours. Le suivi massique révèle une restitution quasi-instantanée de la masse initiale des corps d'épreuve. Ceci tend à confirmer les résultats de la section 3.3 concluant à un séchage superficiel uniquement de ces corps d'épreuve. Le calage des paramètres de gonflement libre montre que, si les amplitudes et les temps caractéristiques des réactions sont comparables, on note une diminution substantielle du temps de latence par rapport aux corps d'épreuve conservés en eau lors de la première phase des essais (cf. Tableau 3-27). Ceci appuie les conclusions de la section 3.4 qui laissent penser que l'absence de gonflements sans apports d'eau lors de la première phase peut être le fruit d'un effet de cinétique et non d'une impossibilité de développer des expansions : en effet, cette diminution du temps de latence implique qu'une partie de la réaction a été « consommée » lors de la première phase du programme expérimental. Par la suite, lors d'une humidification, les expansions se déclarent beaucoup plus rapidement.

Pour les éprouvettes initialement séchées à 30 % HR, on observe un démarrage des gonflements plus tardif que pour les éprouvettes initialement scellées ou même que pour les éprouvettes initialement humidifiées (cf. Figure 3-73). Ceci peut trouver son origine dans le séchage sévère imposé au matériau lors de la première phase des essais de gonflement libre : les considérations théoriques de la section 3.2 montrent que le séchage atteint rapidement le cœur des éprouvettes. Ceci semble confirmé par le suivi massique : les variations relatives de masse passent quasi-instantanément de -4% à -2% lors du remouillage puis augmentent lentement sans pour autant atteindre le niveau de masse initial. Ce dernier n'est d'ailleurs franchi qu'à la faveur du développement des gonflements favorisant l'entrée d'eau par l'ouverture du réseau poreux (*Petrov & Tagnit-Hamou 2004*). Le manque d'eau dans le matériau pourrait ainsi retarder le développement des gonflements. Initialement, lors du remouillage, on n'observe que peu de gonflement hydrique venant contrebalancer le retrait de séchage (cf. Figure 3-73). Par la suite, durant environ 80 jours, peu de phénomènes sont observés à l'échelle macroscopique. Les gonflements se développent ensuite rapidement, suivant une cinétique qui semble proche de celle des éprouvettes initialement scellées (voire même un peu plus rapide ce qui pourrait s'expliquer par le développement d'une microfissuration de séchage). On notera dans ce cas de figure une dispersion assez importante des résultats bien que les mêmes précautions expérimentales que pour les autres essais aient été prises. Après 300 jours de suivi, on mesure des gonflements de l'ordre de 1,38 % en cours de stabilisation (déformation asymptotique de 1,54 %). Ainsi, l'application d'un séchage sévère à un matériau susceptible ne conduit pas à la suppression de son potentiel d'expansion.

Tableau 3-27 : calage des paramètres du modèle de gonflement libre – formule R1 – éprouvettes immergées

	R1_I-H30_GL_28	R1_S-I_GL_28	R1_H30-I_GL_28
ε_{∞}	1,58%	1,49%	1,54%
τ_C (jours)	11	12	9
τ_L (jours)	83	54	119
ϕ (jours)	18	14	40
δ (jours)	120	119	111

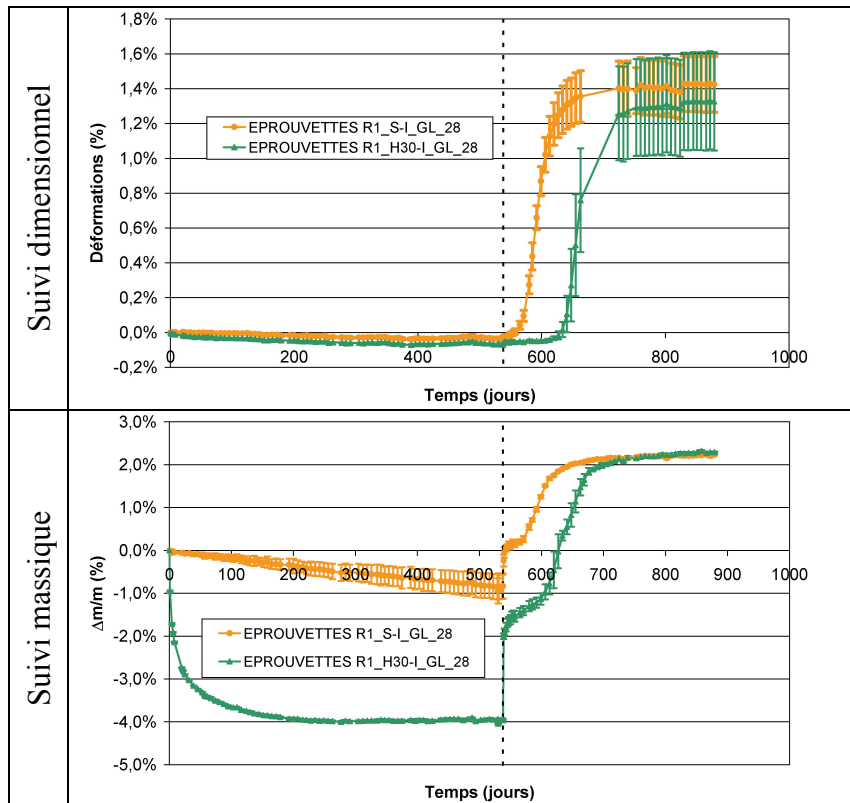


Figure 3-72 : suivis dimensionnels et massiques – éprouvettes R1 – humidification tardive (immersion)

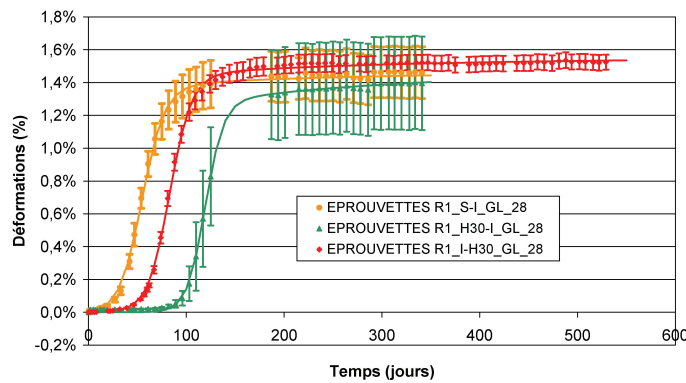


Figure 3-73 : comparaison des gonflements pour différentes histoires hydriques – formule R1 – I-H30 : suivi dimensionnel initial ; S-I et H30-I : suivi dimensionnel recalé

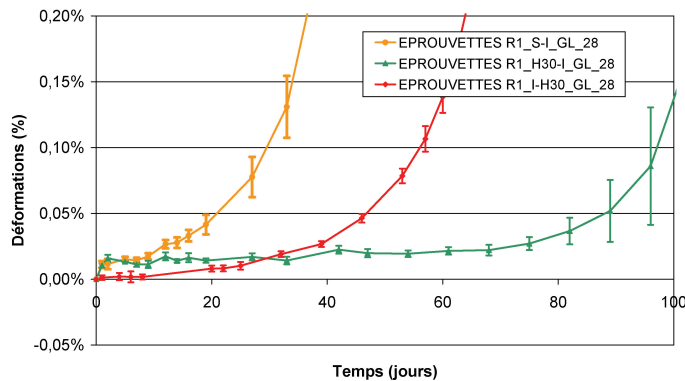


Figure 3-74 : comparaison des gonflements pour différentes histoires hydriques – formule R1 (zoom)

Par ailleurs, on assiste à une fissuration importante des corps d'épreuve en surface dans le cas de l'humidification des corps d'épreuve séchés initialement. Cette fissuration

est très nettement moins marquée dans le cas des éprouvettes initialement protégées de la dessiccation. Cette différence peut s'expliquer par le développement de gonflements empêchés en surface pour les éprouvettes H30-I : la peau du corps d'épreuve se met à gonfler plus tôt que le cœur dont le degré de saturation remonte plus lentement. Par conséquent, les expansions empêchées induisent une fissuration. L'absence de tels gradients de degré de saturation dans le cas des éprouvettes S-I assure un gonflement plus homogène et limite donc la fissuration.

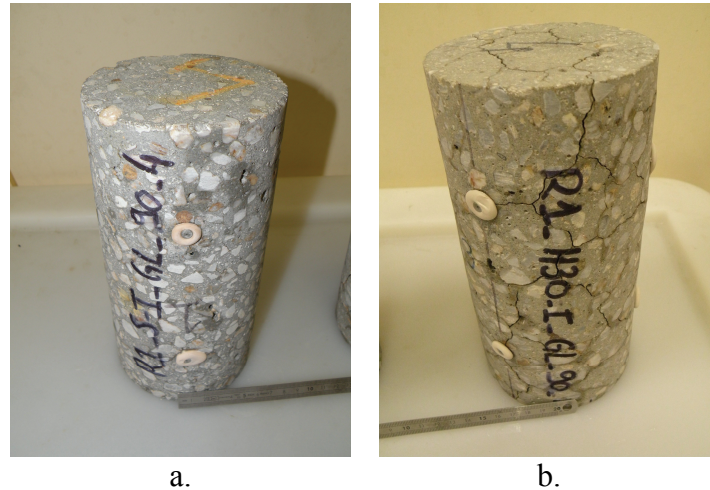


Figure 3-75 : faciès de fissuration des éprouvettes R1 soumises à une humidification tardive (a. R1_S-I_GL_90_4 ; b. R1_H30-I_GL_90_4)

La Figure 3-76 confronte les estimations de gonflement volumique obtenues à partir des mesures dimensionnelles et des suivis massiques suivant la démarche décrite en section 7.2. Pour les éprouvettes soumises à une humidification tardive, on retrouve les effets de la perte de masse de la première phase expérimentale conduisant à une estimation de gonflement volumique négatif. Il est évident que l'hypothèse formulée dans la section 7.2 instaurant l'estimation du gonflement volumique sur la base de la prise de masse ne s'applique pas dans ce cas : aucune expansion ne se produit durant la première phase des essais et les échanges hydriques sont donc uniquement le fruit de phénomènes de dessiccation. Néanmoins, il a été décidé de réaliser notre analyse sur la durée totale des expérimentations (et non uniquement sur la phase d'humidification tardive). Ceci permet notamment d'observer si la première phase des essais conduit à des effets d'hystérésis ou si au contraire l'histoire hydrique du matériau n'a pas d'effets sur le comportement expansif.

D'une manière générale, on observe que les matériaux ont un comportement similaire durant la phase d'expansion intense, quelle que soit leur histoire hydrique antérieure à l'humidification : les deux estimations du gonflement volumique sont liées par une relation linéaire durant la phase de gonflement intense du matériau (cf. Tableau 3-28). Les corps d'épreuve R1_S-I_GL_28 et R1_I-H30_GL_28 présentent un comportement hydrique tout à fait comparable : en particulier, la part d'eau mobilisée par absorption capillaire apparaît similaire (distance de la courbe expérimentale à la bissectrice comparable dans les deux cas). En revanche, dans le cas des éprouvettes R1_H30-I_GL_28, la prise de masse initiale semble plus conséquente (distance à la bissectrice plus importante, i.e. la courbe réelle s'éloigne de la solution idéale ne considérant une prise de masse que par remplissage des fissures nouvellement formées). Ceci semble logique dans la mesure où le stockage à 30 % HR durant la première partie des essais a très certainement conduit à une microfissuration créant d'autant plus de sites d'absorption d'eau et/ou de précipitation d'ettringite.

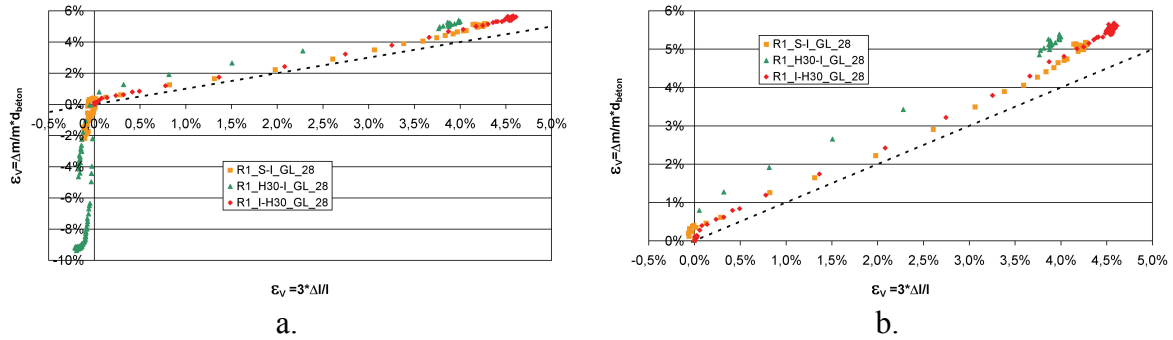


Figure 3-76 : confrontation des estimations de gonflement volumique à partir des gonflements axiaux et des prises de masse – éprouvettes immergées (a. vue générale ; b. zoom)

Tableau 3-28 : paramètres de régression linéaire des courbes de gonflement volumique – formule R1 – cas d’une humidification tardive

	R1_I-H30_GL_28	R1_S-I_GL_28	R1_H30-I_GL_28
Pente	1,144	1,081	1,011
Ordonnée à l'origine	0,1953%	0,2408%	1,1101%
Coefficient de corrélation	0,999	0,998	0,999

10.1.2.2 Couplage entre gonflements et degré de saturation

Dans le cadre de ces travaux, la réalisation de mesures d’humidité relative fiable s’est révélée délicate, plus particulièrement pour de hautes humidités pour lesquelles la précision des capteurs est souvent plus difficile à garantir. *In situ*, la réalisation de mesures d’humidité nécessite de nombreuses précautions (Andrade et al. 1999, Grasley et al. 2006, Wood 2010) et est fortement dépendante des variations de température dont on peut s’affranchir en laboratoire. Par ailleurs, les modèles disponibles dans la littérature (pour la RSI ou pour la RAG) sont souvent basés sur des lois de couplage entre expansion et degré de saturation du matériau (Poyet 2003, Grimal 2007, Baghdadi 2008). Ainsi, il apparaît intéressant de confronter nos données de gonflement libre dans différentes conditions hydriques aux degrés de saturation correspondant.

La relation (3-25) donne la définition générale du degré de saturation d’un matériau poreux. La difficulté pour l’estimation du degré de saturation dans nos conditions expérimentales réside dans le fait qu’on ne peut mesurer à chaque échéance la masse saturée et la masse sèche des éprouvettes : on dispose uniquement de la pesée de chaque corps d’épreuve.

Pour un matériau ne développant pas d’expansion, on a :

$$\begin{cases} M(t) = M_{\text{sèche}} + S_r(t) \cdot p \cdot V \cdot \rho_{\text{eau}} \\ p = \text{porosité initiale du matériau} \\ V = \text{volume initial du matériau} \\ \rho_{\text{eau}} = \text{masse volumique de l'eau} \end{cases} \quad (3-31)$$

V peut être calculé à partir de la masse du matériau en début d’essai et de la masse volumique initiale. M_{sèche} peut être déduite de la masse initiale du matériau à laquelle on soustrait la masse d’eau dans le matériau accessible grâce au degré de saturation initial et à la porosité accessible à l’eau, toutes deux mesurées pour le béton R1 et respectivement

égales à 0,89 et 14,86 %. Le degré de saturation peut donc être calculé à chaque instant en appliquant la relation :

$$S_r(t) = \frac{M(t) - M_{\text{sèche}}}{p \cdot V \cdot \rho_{\text{eau}}} \quad (3-32)$$

Cette expression ne peut être appliquée au cas d'éprouvettes développant des expansions. En effet, nous avons démontré que dans ce cas, les gonflements conduisent à une modification du comportement hydrique aboutissant à des prises de masses asymptotiques supérieures à celles développées par un matériau sain équivalent. Le degré de saturation ainsi calculé est donc supérieur à 1 ce qui est impossible.

L'analyse des données expérimentales a montré que la prise de masse est principalement le résultat du remplissage par de l'eau des vides créés par l'expansion (cf. section 7.2). Ainsi, cette intrusion d'eau ne contribue pas directement à la saturation du matériau considéré sain en début d'essai. Dans le cas de gonflements, on peut donc écrire, en supposant que les gonflements sont isotropes :

$$M(t) = M_{\text{sèche}} + S_r(t) \cdot p \cdot V \cdot \rho_{\text{eau}} + 3 \cdot \varepsilon \cdot V \cdot \rho_{\text{eau}} \quad (3-33)$$

De cette manière, on peut accéder au degré de saturation du matériau :

$$S_r(t) = \frac{M(t) - M_{\text{sèche}} - 3 \cdot \varepsilon \cdot V \cdot \rho_{\text{eau}}}{p \cdot V \cdot \rho_{\text{eau}}} \quad (3-34)$$

Le cas des éprouvettes humidifiées tardivement fait l'objet d'un traitement particulier : dans un premier temps, le calcul du degré de saturation est effectué à l'aide de la relation (3-32). On obtient ainsi une évaluation du degré de saturation à l'issue de la première phase des essais. A l'instant de remouillage, le corps d'épreuve est susceptible de développer des expansions. Par conséquent, il convient de considérer la part de prise de masse issue du remplissage des fissures nouvellement créées et ne contribuant pas directement à la saturation du matériau considéré en début d'essai. On a alors la relation :

$$\begin{cases} S_r(t) = \frac{M(t) - M_{\text{sèche}} - 3 \cdot \varepsilon_{\text{recalé}} \cdot V \cdot \rho_{\text{eau}}}{p \cdot V \cdot \rho_{\text{eau}}} \\ \varepsilon_{\text{recalé}} = \varepsilon(t) - \varepsilon(t = \text{remouillage}) \end{cases} \quad (3-35)$$

La Figure 3-77.a illustre les évolutions dimensionnelles des éprouvettes R1 en fonction du degré de saturation moyen des éprouvettes (en effet, un gradient de degré de saturation plus ou moins important se développe dans les corps d'épreuve durant leur exposition – ce calcul de degré de saturation est basé sur la pesée des éprouvettes et moyenne donc le S_r du matériau). On note que le degré de saturation final des éprouvettes n'est pas égal à 1, indiquant que le matériau ne serait pas saturé en fin d'essai. Etant donné les durées d'exposition des corps d'épreuve, ceci semble peu probable. Nous avons attribué cet écart à un biais dans la détermination initiale du degré de saturation (même si des biais dans la détermination des autres caractéristiques utilisées dans ce calcul peuvent également induire une erreur, au même titre que l'hypothèse de remplissage instantané par l'eau des vides nouvellement créés par l'expansion). Ainsi, nous avons réalisé un recalage du degré

de saturation initial afin d'estimer une saturation totale du matériau en fin d'essai. Les résultats de ce recalage sont donnés par la Figure 3-77.b et le Tableau 3-29.

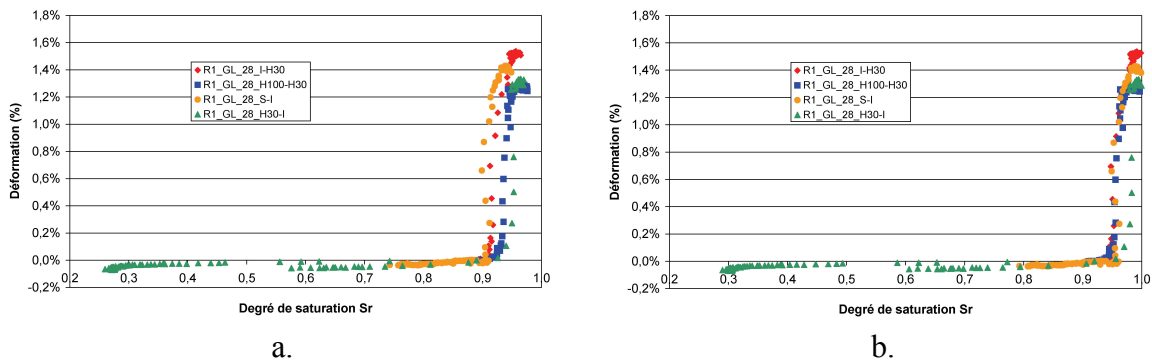


Figure 3-77 : couplage entre gonflement et degré de saturation – formule R1 (a. avant recalage du degré de saturation initial ; b. après recalage)

Tableau 3-29 : estimation des degrés de saturation initiaux des éprouvettes R1

	R1_I-H30_GL_28	R1_H100-H30_GL_28	R1_S-I_GL_28	R1_H30-I_GL_28
Sr_0	0,925	0,93	0,94	0,92

A la lumière de ces données, il semble qu'en dessous d'un seuil de degré de saturation de l'ordre de 0,95, aucune expansion n'est mesurée. Ce seuil apparaît très nettement plus élevé que le seuil de déclenchement de la RAG estimé par (Poyet 2003). Ceci est toutefois en accord avec les données disponibles dans la littérature indiquant des seuils de HR plus élevés pour la RSI que pour la RAG (Graf 2007, Rust 2009).

10.1.2.3 Influence de l'histoire du matériau : effets de l'échéance de carottage

La Figure 3-78 confronte les suivis dimensionnels des corps d'épreuve carottés à 28 jours (gonflement libre) et à 90 jours (expansion résiduelle) soumis à une humidification tardive. Les données équivalentes pour un séchage tardif ont montré des comportements similaires vis-à-vis du retrait de dessiccation. Les résultats de la présente section montrent que cette conclusion n'est pas valable dans le cas d'une humidification tardive induisant une expansion. Les calages de paramètres de modélisation des gonflements libres donnés dans le Tableau 3-30 montrent que les temps caractéristiques et les amplitudes d'expansion sont similaires dans tous les cas. En revanche, on note une diminution significative du temps de latence pour les corps d'épreuve carottés à 90 jours par rapport à ceux l'ayant été à 28 jours.

A condition de conservation donnée, l'échéance de carottage constitue a priori la seule différence entre ces corps d'épreuve. En effet, les blocs de carottage des cylindres ont été fabriqués lors du même coulage, avec la même gâchée et ont été vibrés de façon identique. Le (ou les) élément(s) susceptible(s) de générer ces différences de comportement expansif est (sont) donc plus probablement à rechercher durant la phase de stockage du bloc destinés aux carottages à une échéance de 90 jours. Durant cette période, blocs et cylindres de gonflement libre sont soumis aux mêmes conditions d'exposition extérieure. Les blocs présentent un rapport surface d'échange/volume inférieur à celui des cylindres (respectivement $23,17 \text{ m}^{-1}$ et $36,36 \text{ m}^{-1}$). Par conséquent, il est possible que les matériaux constitutifs des blocs soient maintenus à un niveau d'humidité plus élevé à cœur

durant les 62 jours d'exposition précédant le carottage des cylindres d'expansion résiduelle. A une échéance de 60 jours, les éprouvettes R1_I-H30_GL_28 et R1_H100-H30_GL_28 ont développé des expansions de l'ordre de 0,1 %. Si un tel niveau de gonflement n'a certainement pas été atteint dans les blocs (leur degré de saturation étant certainement inférieur à celui des corps d'épreuve conservés en eau et à 100 % HR), il reste possible qu'un début d'expansion soit responsable d'une microfissuration au cœur des blocs par opposition aux éprouvettes de gonflement libre carottées avant que ce phénomène ne se produise. Cette dernière pourrait alors induire une accélération des phénomènes de gonflement comme l'ont montré (Yang *et al.* 1996) ou (Petrov & Tagnit-Hamou 2004) par exemple.

Si cette explication paraît plausible, elle dépend néanmoins fortement du degré d'expansion qui a pu être développé préalablement au carottage des cylindres d'expansion résiduelle. L'absence de gonflements lors de la première phase des essais pour les corps d'épreuve conservés sous scellement hydrique et à 30 % HR laisse présager qu'un tel phénomène pourrait avoir une influence marginale. Il apparaît donc probable que d'autres mécanismes entrent en jeu pour expliquer ces différences de comportement expansif. Toutefois, en l'absence d'investigations complémentaires, il apparaît délicat d'avancer d'autres explications pertinentes sur ce point. Afin d'étudier ce phénomène, une caractérisation précise de la porosité, de la saturation et de la microporosité au moment du carottage à 28 jours et à 90 jours pourraient apporter des éléments de réflexion intéressants. Compte tenu du plan de charge expérimental déjà pris en charge, ces investigations n'ont pu être menées dans le délai de rédaction de cette thèse. Néanmoins, ces essais pourront être réalisés avant la finalisation de ce programme.

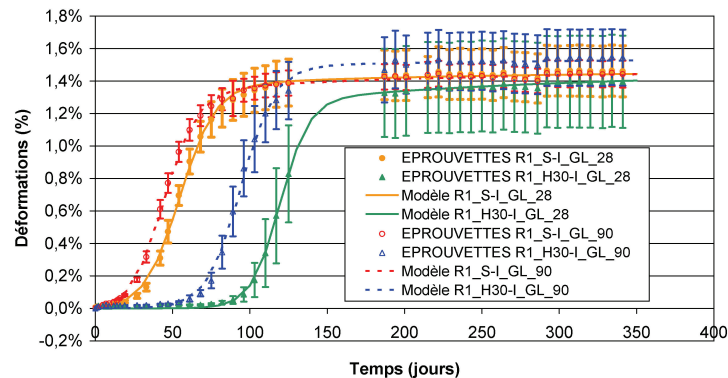


Figure 3-78 : comparaison des suivis dimensionnels des éprouvettes soumises à une humidification tardive – formule R1 – carottage à 28 jours et 90 jours

Tableau 3-30 : calage des paramètres de la loi de gonflement libre pour les suivis dimensionnels recalés à 538 jours en fonction de l'échéance de carottage – formule R1 – éprouvettes immergées tardivement

Formule	R1	R1	R1	R1
Conservation	S-I	S-I	H30-I	H30-I
Échéance de carottage	28	90	28	90
ε_{∞}	1,49%	1,51%	1,54%	1,56%
τ_C (jours)	12	11	9	11
τ_L (jours)	54	44	119	94
ϕ (jours)	14	20	40	10
δ (jours)	119	120	111	119

10.2 Influence de la réactivité du matériau

10.2.1 Effets d'un séchage tardif

La Figure 3-79 synthétise les suivis dimensionnels et massiques des éprouvettes soumises à un séchage après 538 jours de conservation en eau ou à 100 % HR respectivement et pour une échéance de carottage de 28 jours. Dans tous les cas, on mesure un retrait de dessiccation bien inférieur aux gonflements développés lors de la première phase des expérimentations.

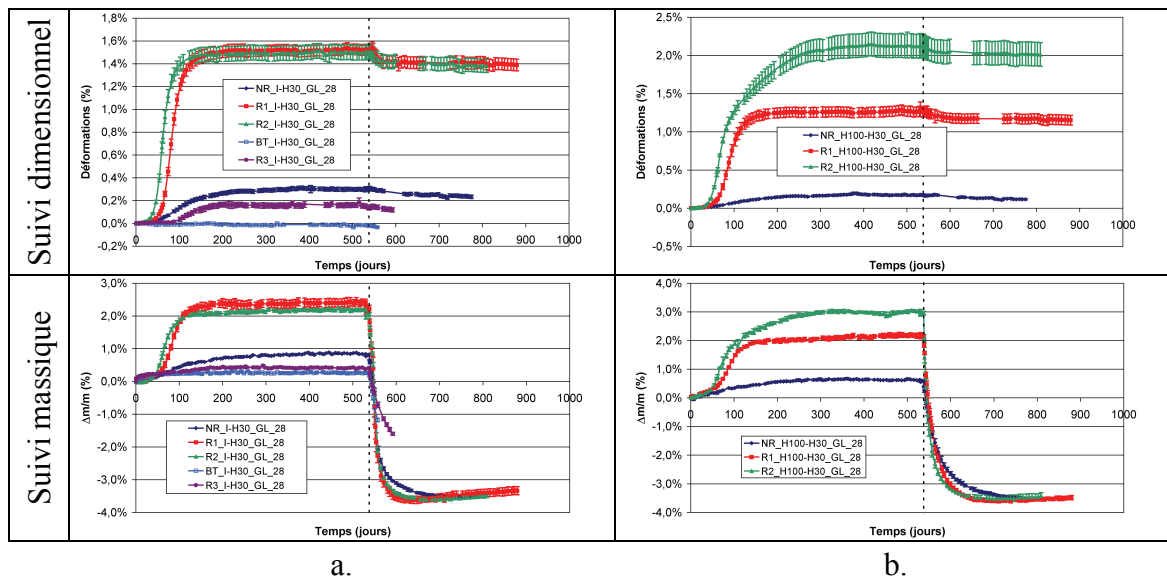


Figure 3-79 : suivis dimensionnels et massiques des éprouvettes de gonflement libre conservées initialement en eau (a.) ou à 100 % HR (b.) et soumises à un séchage tardif à 30 % HR

La Figure 3-80 et la Figure 3-81 confrontent les suivis dimensionnels et massiques recalés à l'instant de basculement des conditions de conservation hydriques pour les cylindres carottés à 28 jours et soumis à un séchage tardifs à ceux d'éprouvettes exposées à une atmosphère de 30 % HR lors de la première phase des essais. Pour une formule de béton donnée, ces résultats montrent un comportement similaire vis-à-vis de la dessiccation, que les corps d'épreuve aient été initialement conservés en eau ou à 100 % HR. Par ailleurs, les éprouvettes R1 et R2 présentent des déformations comparables et ce malgré des expansions parfois très différentes lors de la première phase des essais (amplitude de gonflement notamment beaucoup plus importante dans le cas de R2_H100-H30_GL_28). Conformément aux conclusions de la section 10.1.1.1, le retrait de ces matériaux est plus important après le développement d'expansions, en comparaison à un séchage « précoce ». Le retrait des corps d'épreuve NR apparaît quant à lui moins important et similaire à celui mesuré pour les trois bétons lors de la première phase. Les comportements vis-à-vis de la dessiccation des corps d'épreuve carottés à 90 jours sont similaires et ne sont pas représentés ici. On trouvera en Annexe 5 une représentation exhaustive de l'ensemble des données.

A l'instar du raisonnement que nous avons tenu en section 10.1.1.1, la différence de contraction hydrique constatée pour R2 après développement des expansions peut provenir soit d'une modification du comportement mécanique du béton vis-à-vis de la dessiccation, soit d'une différence de saturation initiale du matériau.

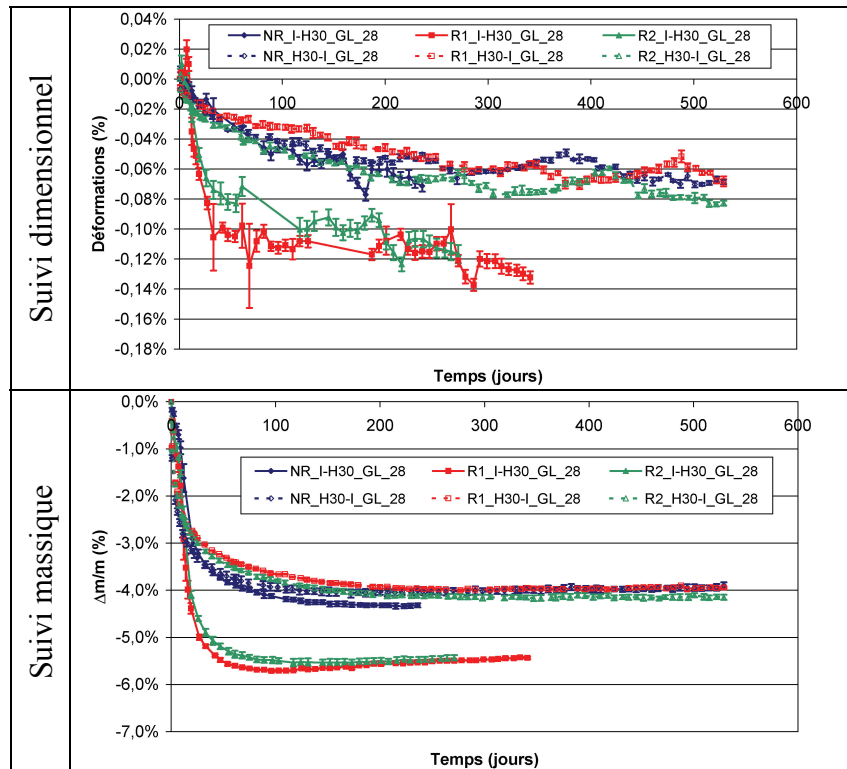


Figure 3-80 : confrontation des déformations de retrait et des pertes de masse des corps d'épreuve I-H30_GL_28 et H30-I_GL_28

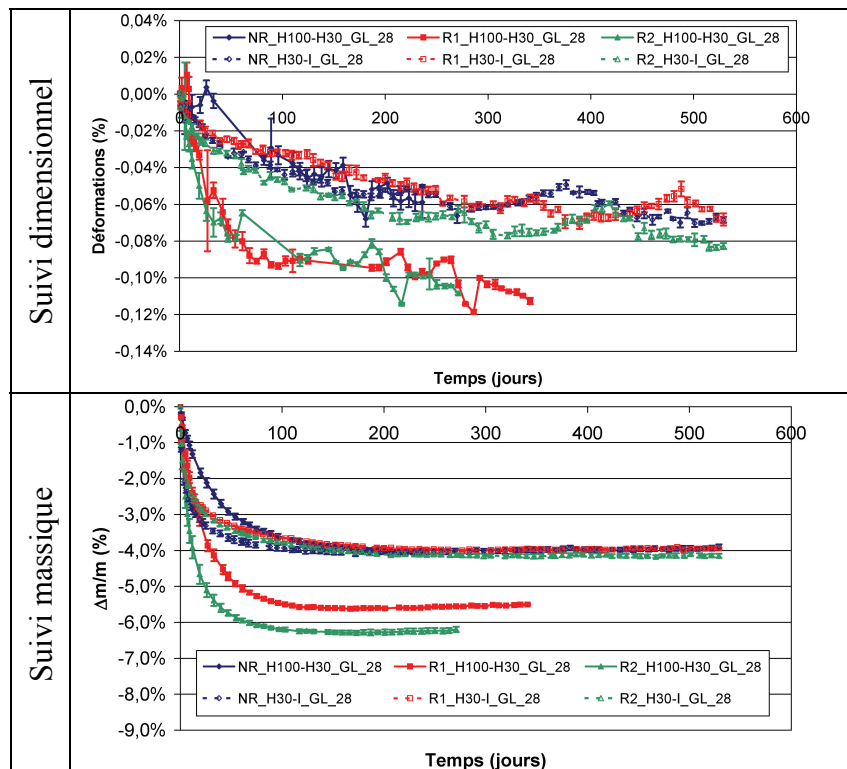


Figure 3-81 : confrontation des déformations de retrait et des pertes de masse des corps d'épreuve H100-H30_GL_28 et H30-I_GL_28

La Figure 3-82 représente l'évolution des déformations mesurées en fonction des pertes de masse d'une couronne extérieure de béton d'une éprouvette (2 cm d'épaisseur) (démarche présentée en section 10.1.1.1). Comme pour les résultats des sections 7.1 et

10.1.1, on note l'existence d'une relation linéaire entre ces deux paramètres au delà d'une certaine perte de masse. Les Figure 3-82.b, c, et d correspondent respectivement aux formules NR, R1 et R2. Les paramètres de régression linéaire correspondants sont consignés dans le Tableau 3-31, le Tableau 3-32 et le Tableau 3-33. A l'instar des conclusions établies pour la formule R1 dans la section 10.1.1, on observe que le développement d'expansions durant la première phase des expérimentations a conduit à une modification du comportement du matériau vis-à-vis de la dessiccation : on note systématiquement une augmentation de la pente entre déformation et perte de masse normalisée, induisant des taux de déformation de retrait plus élevés lors du séchage de la seconde phase du programme expérimental. Toutefois, ces différences de pente entre séchage initial et tardif sont moins marquées dans le cas des corps d'épreuve NR : ceci est en accord avec les résultats correspondant à la Figure 3-80 et la Figure 3-81 mettant en évidence des déformations comparables dans les deux cas. Cette conclusion est également en accord avec les résultats de (*Multon 2004*) dans le cadre de son étude de la RAG ne mettant en évidence aucune modification du comportement de dessiccation dans le cas d'un séchage suivant le développement de gonflement de réaction alcali-silice. Ainsi, il semble que pour des déformations modérées et au moins jusqu'à 3 à 4 ‰, le retrait de dessiccation ne soit que peu modifié. Ceci peut s'expliquer par des degrés de fissuration augmentant avec l'amplitude des expansions et favorisant le séchage. Pour de faibles niveaux de gonflement, on altère moins la structure des composites cimentaires et par conséquent leurs caractéristiques sont moins altérées. Une évaluation quantitative de cette explication mériterait d'être menée à partir de considération théoriques telles que celles présentées par (*Bary 2010*).

Tableau 3-31 : paramètres de régression linéaire de la relation déformation / variation relative de masse- formule NR – carottage à 28 jours ou 90 jours

Formule	NR	NR	NR	NR	NR
Carottage (j)	28	28	90	28	90
Conservation	H30-I	I-H30	I-H30	H100-H30	H100-H30
Pente	0,0023	0,0034	0,0031	0,0028	0,0027
Ordonnée à l'origine (%)	0,1912	0,2826	0,2505	0,2235	0,2160
Coefficient de corrélation	0,980	0,989	0,972	0,880	0,952

Tableau 3-32 : paramètres de régression linéaire de la relation déformation / variation relative de masse- formule R1 – carottage à 28 jours ou 90 jours

Formule	R1	R1	R1	R1	R1
Carottage (j)	28	28	90	28	90
Conservation	H30-I	I-H30	I-H30	H100-H30	H100-H30
Pente	0,0013	0,0032	0,0027	0,0028	0,0031
Ordonnée à l'origine (%)	0,0892	0,2192	0,1481	0,1801	0,2177
Coefficient de corrélation	0,972	0,961	0,989	0,989	0,982

Tableau 3-33 : paramètres de régression linéaire de la relation déformation / variation relative de masse- formule R2 – carottage à 28 jours ou 90 jours

Formule	R2	R2	R2	R2	R2
Carottage (j)	28	28	90	28	90
Conservation	H30-I	I-H30	I-H30	H100-H30	H100-H30
Pente	0,0013	0,0031	0,0034	0,0026	0,0025
Ordonnée à l'origine (%)	0,0888	0,2204	0,2451	0,1715	0,1604
Coefficient de corrélation	0,991	0,996	0,981	0,989	0,965

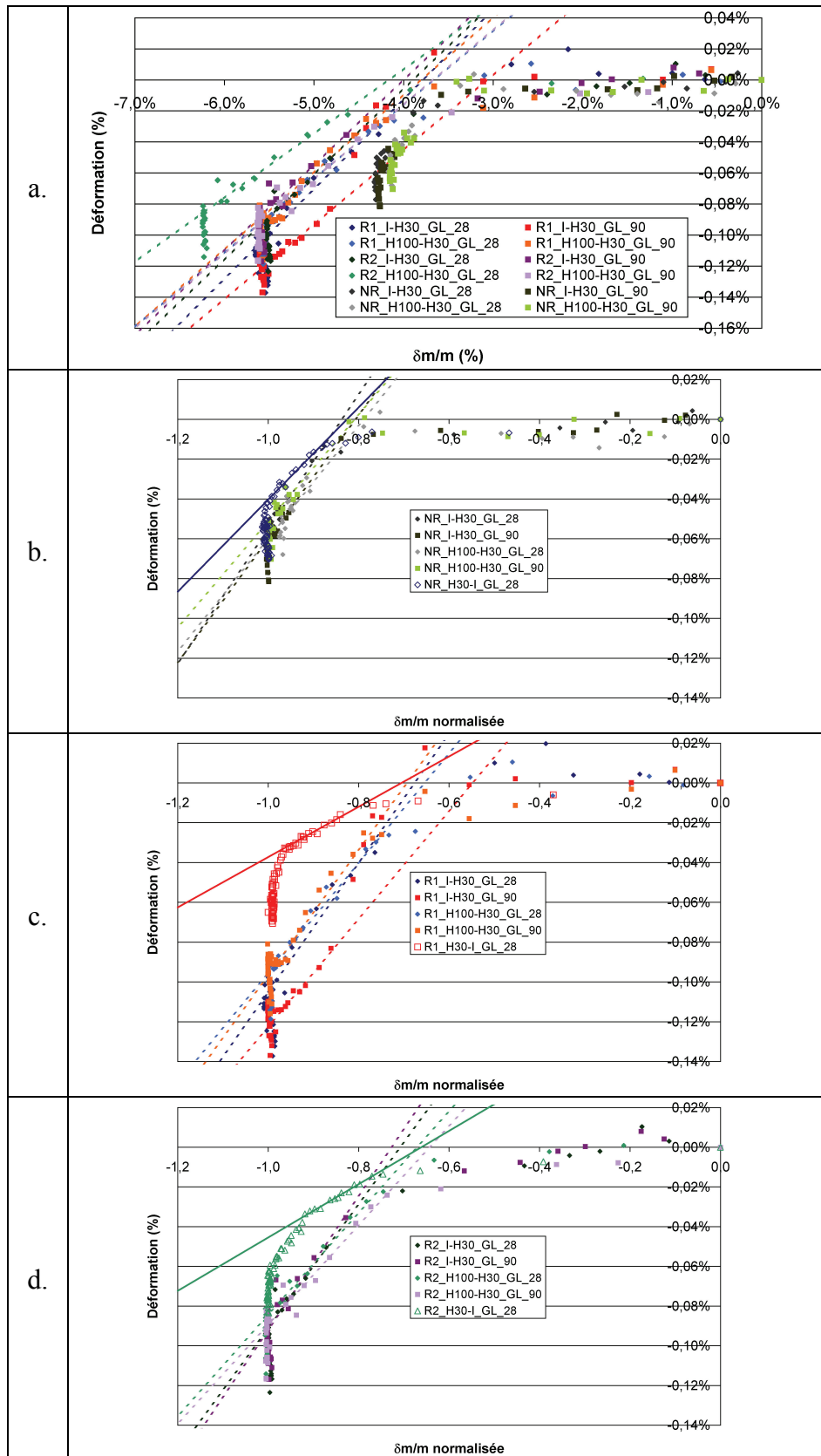


Figure 3-82 : déformation de retrait mesurée en fonction de la variation relative de masse normée d'une couronne de béton de 2 cm d'épaisseur – carottage à 28 jours et 90 jours

a. Synthèse des données

b. Formule NR

c. Formule R1

d. Formule R2

10.2.2 Effets d'une humidification tardive

10.2.2.1 Eprouvettes de gonflement libre

La Figure 3-83 et la Figure 3-84 représentent les évolutions dimensionnelles et massiques des éprouvettes NR, R1 et R2 (ainsi que BT et R3 dans le cas H30-I) soumises à une humidification tardive. Les trois matériaux présentent un comportement général similaire décrit ci-après.

Pour les corps d'épreuve conservés initialement sous scellement hydrique, le séchage superficiel de la première phase des essais semble confirmé puisqu'on assiste à une restauration de la masse initiale quasi-instantanée lors de l'immersion. On observe par la suite une période de latence relativement courte à l'issue de laquelle les gonflements se déclarent. Les principaux effets de cinétique et d'amplitude mis en évidence dans les sections 3, 4 et 5 sont ici retrouvés : même si l'amplitude d'expansion de la formule R2 est supérieure à celle de R1, elles restent comparables étant donné la dispersion des résultats ; par ailleurs, l'ordre de développement des RGI déterminé par les essais de gonflement libre est ici respecté (expansion des éprouvettes R2 puis R1 et enfin NR).

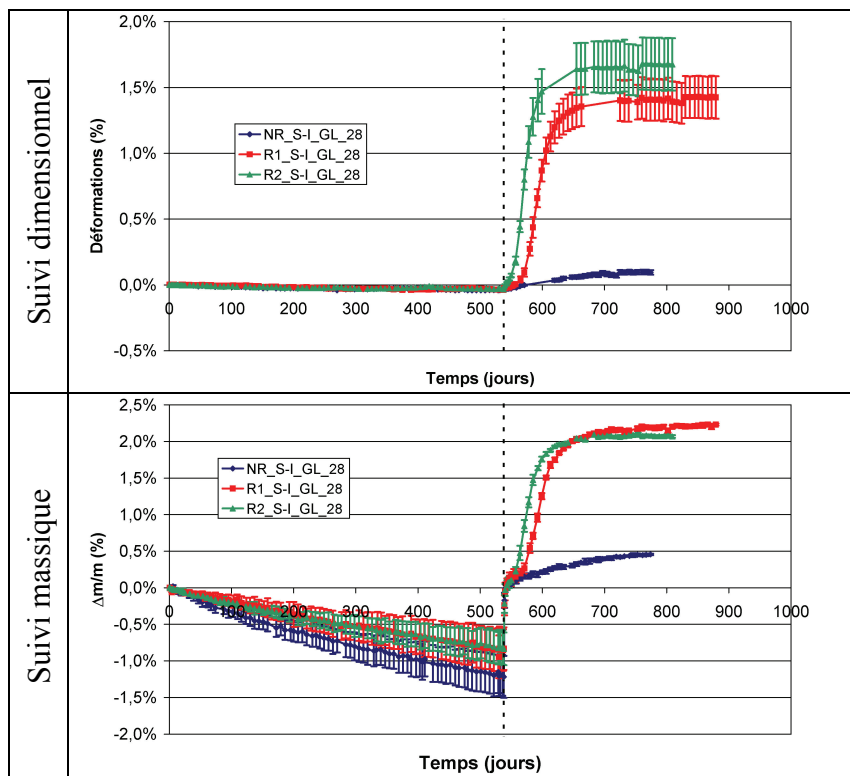


Figure 3-83 : suivis dimensionnels et massiques consécutifs à une humidification tardive – conservation initiale sous scellement aluminium

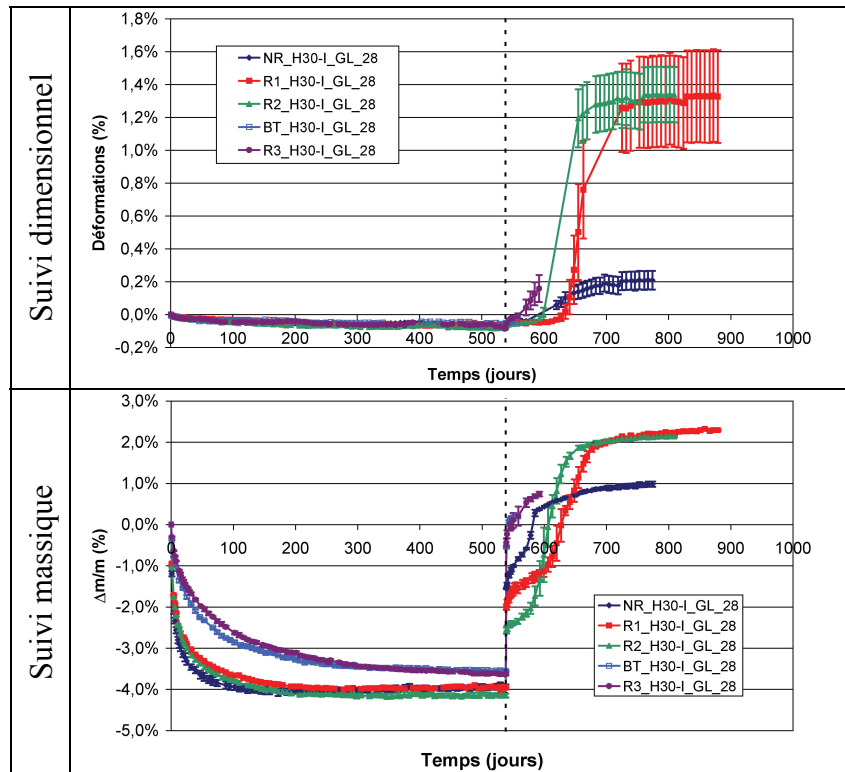


Figure 3-84 : suivis dimensionnels et massiques consécutifs à une humidification tardive– formules NR, R1 et R2 – conservation initiale sous scellement aluminium

Les suivis dimensionnels et massiques des corps d'épreuves initialement soumis à un séchage confirment la dessiccation en profondeur des matériaux NR, R1 et R2 : au moment de l'immersion, on observe un gain de masse brutal ne permettant néanmoins pas de restaurer la masse initiale des éprouvettes. Durant les semaines suivantes, on constate un gain de masse progressif correspondant à une re-saturation des matériaux. En revanche, l'humidification tardive confirme les différences de nature de porosité des matériaux BT et R3 sous les effets de la cure thermique. Dans ces deux cas, la restauration de la masse initiale des éprouvettes est quasi-instantanée lors de l'immersion bien que les pertes de masses en fin de séchage soient comparables entre les formules NR, R1 et R2 et BT et R3. Ceci confirme les différences de nature de porosité entre les matériaux soumis à une cure thermique et ceux qui ne l'ont pas été. En effet, la cure thermique accélère l'hydratation des ciments et favorise donc l'autodessiccation interne des matériaux. Ceci pourrait également expliquer l'absence d'expansion (notamment pour la formule R2) pour des corps d'épreuve conservés sous scellement hydrique, le degré de saturation étant alors trop faible pour permettre des gonflements.

A l'image des variations massiques, les déformations ne retrouvent pas leur niveau initial au cours des semaines qui suivent l'immersion. Après un temps de latence plus significatif que dans le cas des éprouvettes protégées des pertes hydriques durant la première phase des essais, on assiste au développement d'expansions importantes. Les effets d'amplitude et de cinétique déterminés par les essais de gonflement libre restent valables (amplitudes similaires pour les formules R1 et R2 et cinétiques décroissantes dans l'ordre R2, R1 et NR).

La Figure 3-85 et la Figure 3-86 représentent respectivement les suivis dimensionnels des corps d'épreuve initialement protégés de la dessiccation ou soumis à un séchage à 30 % HR durant la première phase des essais après recalage à 538 jours (i.e. juste avant l'humidification tardive par immersion). Les effets de cinétique et d'amplitude

mis en évidence au début de cette section sont ici retrouvés (ordre des cinétiques et des amplitudes retrouvés pour les formules NR, R1 et R2). On notera toutefois que la formule R3 présente un temps de latence particulièrement court suite à son remouillage (cf. Figure 3-86). Le basculement des conditions de conservation de ces corps d'épreuve ayant été effectué depuis relativement peu de temps au moment de la rédaction de ce mémoire, il est difficile de conclure sur ce point. La poursuite du suivi dimensionnel permettra notamment de quantifier la valeur de la déformation asymptotique de ce matériau.

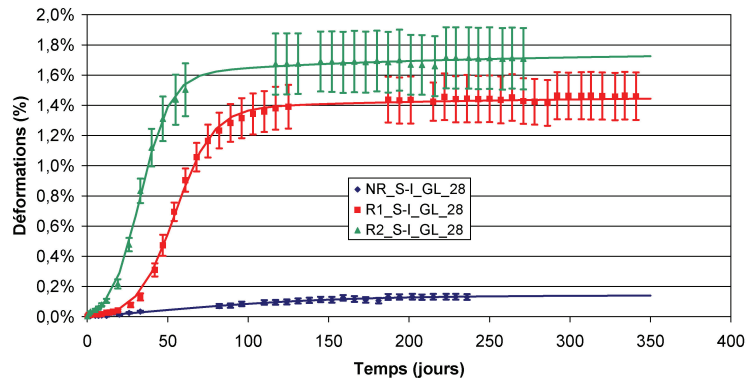


Figure 3-85 : suivis dimensionnels après recalage des éprouvettes de gonflement libre initialement protégées de la dessiccation

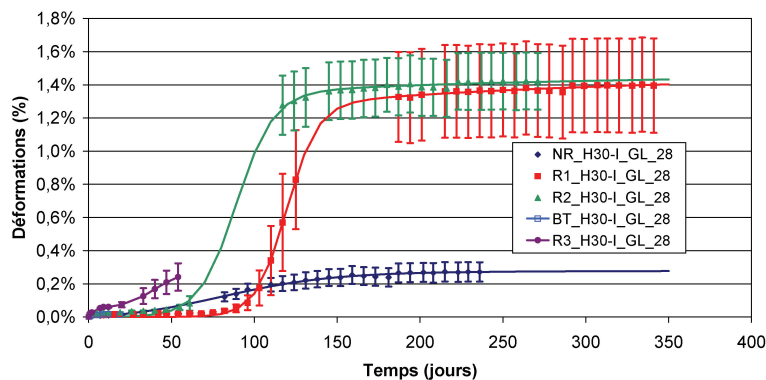


Figure 3-86 : suivis dimensionnels après recalage des éprouvettes de gonflement libre initialement soumises à un séchage à 30 % HR

Le Tableau 3-34 synthétise les paramètres décrivant la courbe de gonflement selon le modèle de (*Brunetaud 2005*) établis sur la base de ces données expérimentales en tenant compte du décalage de l'origine des temps de 538 jours et les confronte aux cinétiques déterminées dans le cadre des essais de gonflement libre des matériaux initialement immergés. Pour les matériaux R1 et R2, on note des comportements similaires :

- à l'exception du cas des éprouvettes R2_S-I_GL_28 (dont l'amplitude particulièrement élevée semble difficilement explicable dans l'état actuel de nos connaissances), les amplitudes d'expansion sont comparables pour ces deux matériaux, quelle que soit l'histoire hydrique des corps d'épreuve ;
- dans le cas d'éprouvettes initialement protégées de la dessiccation, on observe une diminution significative du temps de latence indiquant qu'une partie des réactions chimiques a probablement été initiée durant les 538 premiers jours d'exposition (bien qu'aucun gonflement macroscopique n'ait été décelé durant cette phase des essais) ;
- malgré des histoires hydriques très variables, les temps caractéristiques des gonflements restent très comparables.

Le cas de la formule NR est assez remarquable. Lors de l'humidification tardive des éprouvettes initialement séchées, les amplitudes de gonflement estimées sont plus élevées que pour le cas d'éprouvettes protégées de la dessiccation lors de la première phase des essais (les suivis dimensionnels ayant été initiés il y a peu de temps relativement aux cinétiques de gonflement, ces estimations peuvent se révéler partiellement biaisées). De plus, les temps de latence de réaction sont systématiquement plus faibles que dans le cas d'une humidification précoce. Dans l'état actuel des choses, peu d'explication pertinentes semblent pouvoir être formulées.

Tableau 3-34 : calage des paramètres de modélisation des gonflements libre – effets d'une humidification tardive

Formule	NR	NR	NR	R1	R1	R1	R2	R2	R2
Conservation	I-H30	S-I	H30-I	I-H30	S-I	H30-I	I-H30	S-I	H30-I
Échéance de carottage (j)	28	28	28	28	28	28	28	28	28
ε_{∞}	0,34%	0,14%	0,29%	1,58%	1,49%	1,54%	1,55%	1,79%	1,51%
τ_C (jours)	29	58	33	11	12	9	9	9	11
τ_L (jours)	92	33	79	83	54	119	62	32	89
ϕ (jours)	54	7	13	18	14	40	15	18	23
δ (jours)	84	90	90	120	119	111	120	120	119

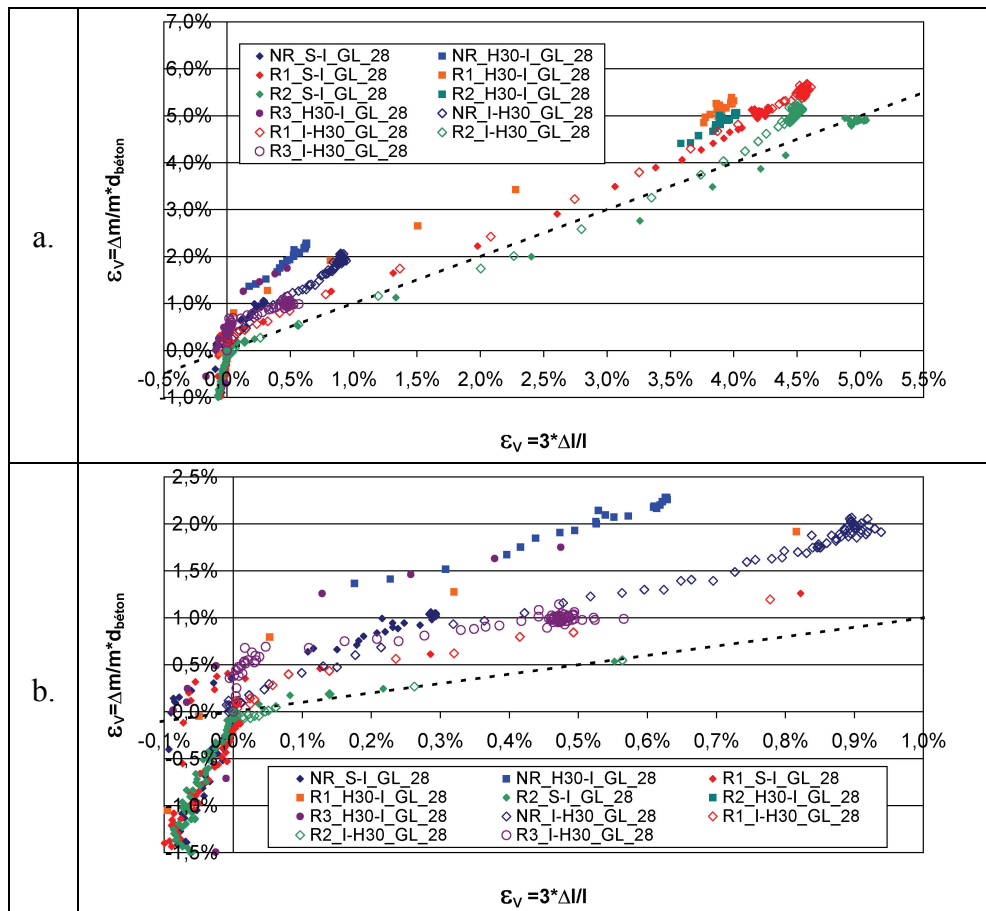
La Figure 3-87 confronte les estimations de gonflement volumique obtenues à l'aide des mesures d'expansion axiale et des suivis massiques. Les conclusions de la section 10.1.2.1 restent valables. En particulier, on note que les corps d'épreuve S-I suivent le « même chemin » que les corps d'épreuve I-H30 : la distance des courbes correspondantes à la bissectrice (correspondant au comportement d'un corps d'épreuve subissant un gain de masse uniquement par remplissage de fissures nouvellement créées) est comparable, indiquant que la prise de masse par absorption capillaire est similaire. En revanche, pour les corps d'épreuve H30-I, la distance de la courbe à la bissectrice est plus importante (cf. Tableau 3-35 et Tableau 3-36). Il semble donc que la microfissuration développée lors du séchage du matériau engendre une prise de masse par absorption capillaire plus importante et/ou un remplissage des pores par l'ettringite. Enfin, les corps d'épreuve NR montrent une fois de plus un comportement spécifique avec une pente supérieure à un durant la phase de gonflement intense. Ce phénomène peut correspondre à un mécanisme de prise de masse mixte entre remplissage des fissures et absorption capillaire.

Tableau 3-35 : paramètres de régression linéaire des courbes de gonflement volumique – influence de l'histoire hydrique – partie 1

Formule	NR	NR	NR	R1	R1	R1
Condition de conservation	I-H30	S-I	H30-I	I-H30	S-I	H30-I
Échéance de carottage (j)	28	28	28	28	28	28
Pente	1,565	2,160	2,033	1,144	1,081	1,011
Ordonnée à l'origine	0,392%	0,373%	0,945%	0,195%	0,241%	1,110%
Coefficient de corrélation	0,988	0,987	0,986	0,999	0,998	0,999

Tableau 3-36 : paramètres de régression linéaire des courbes de gonflement volumique – influence de l'histoire hydrique – partie 2

Formule	R2	R2	R2	R3	R3
Condition de conservation	I-H30	S-I	H30-I	I-H30	H30-I
Échéance de carottage (j)	28	28	28	28	28
Pente	0,961	0,917	1,577	0,870	1,426
Ordonnée à l'origine	-0,020%	-0,046%	-1,286%	0,582%	1,083%
Coefficient de corrélation	0,996	0,997	0,958	0,979	0,999

**Figure 3-87 : confrontation des estimations de gonflement volumique à partir des gonflements axiaux et des prises de masse – éprouvettes soumises à une humidification tardive (a. vue générale ; b. zoom)**

10.2.2.2 Couplage entre gonflements et degré de saturation

La Figure 3-88 représente les gonflements en fonction du degré de saturation moyen obtenu par la méthode de calcul présentée en section 10.1.2.2 pour les bétons NR, R1, R2 et R3 (les essais effectués pour la formule NR ont abouti à l'évaluation d'un degré de saturation initial égal à 0,89 et une porosité de 14,32 % ; aucun essai n'a pu être réalisé pour les bétons R2 et R3 : en l'absence de données, on considère des caractéristiques identiques à R1 – cf. section 10.1.2.2). Le Tableau 3-37 donne les degrés de saturation initiaux des matériaux tels qu'ils sont obtenus par cette méthode.

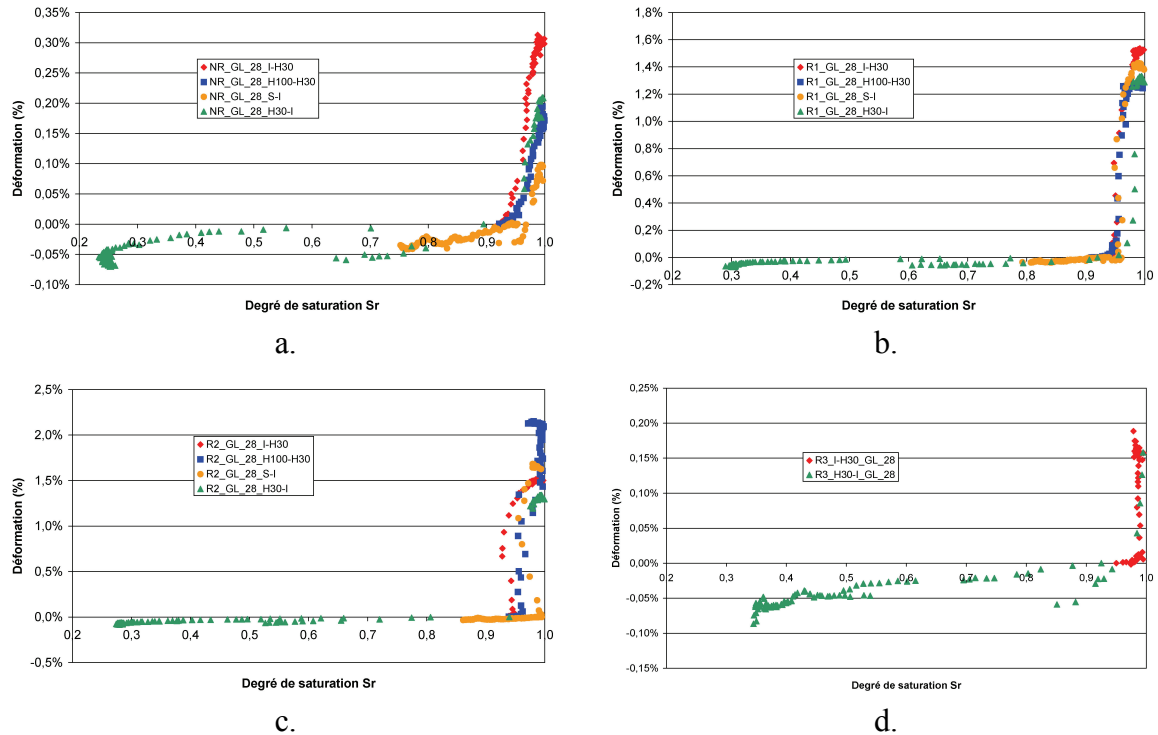


Figure 3-88 : couplage entre gonflement et degré de saturation (a. NR ; b. R1 ; c. R2 ; d. R3)

Tableau 3-37 : estimation des degrés de saturation initiaux – éprouvettes de gonflement libre

	I-H30_GL_28	H100-H30_GL_28	S-I_GL_28	H30-I_GL_28
NR	0,92	0,93	0,95	0,90
R1	0,93	0,93	0,94	0,92
R2	0,95	0,94	1,00	0,94
R3	0,95	-	-	0,93

Pour les bétons NR et R2 plus particulièrement, on remarque que la notion de seuil mise en évidence pour le béton R1 apparaît nettement moins marquée. Le recalage du degré de saturation initial s'est révélé plus délicat que pour le béton R1 et a conduit à des valeurs plus dispersées en fonction des conditions de conservation (cf. Tableau 3-37). Pour le béton NR, il semble qu'un seuil de l'ordre de 0,93 puisse être identifié. Une telle différence de seuil est induite par l'initiation plus précoce des gonflements lors de l'humidification tardive des éprouvettes NR (cf. Figure 3-86).

La concomitance RSI-RAG ne semble pas avoir modifié de manière significative le seuil de degré de saturation au-delà duquel on observe des expansions par rapport à R1. Les valeurs de seuil identifiables sont comprises entre 0,95 et 0,96, exception faite des corps d'épreuve R2_S-I_GL_28 pour lesquels le seuil est voisin de 0,99. Durant la phase de gonflement intense, on note d'une manière générale une diminution du degré de saturation calculé. Cette diminution n'est très probablement pas une réalité physique et correspond à un biais de notre hypothèse considérant la totalité des vides nouvellement créés comme remplis par l'eau instantanément : sur la Figure 3-87, on observe que certains points des éprouvettes R2 se situent dans la zone inférieure du graphe divisé en deux par la bissectrice ; cette zone correspond à des matériaux dont les vides créés par l'expansion ne se remplissent pas instantanément par de l'eau. Dans ce cas, le calcul mis en œuvre « supprime » des variations massiques mises en jeu en réalité pour la saturation du matériau. Ce résultat peut s'expliquer qualitativement par les expansions très rapides du

béton R2 créant des fissures plus vite qu'elles ne peuvent se remplir. Dans le cas des éprouvettes R2_S-I_GL_28 représentant le cas le moins satisfaisant, la variation de masse correspondant à la diminution maximale de degré de saturation de 0,04 correspond à une perte de masse des éprouvettes d'environ 12 g. La contribution de masse imputée au développement d'expansions est quant à elle de 110 g soit une erreur relative de l'ordre de 11 %.

Le comportement de R3 se révèle singulier avec un seuil de degré de saturation de l'ordre de 0,98. Ce résultat ne semble pas en accord avec les résultats de la littérature mettant en évidence un seuil d'humidité de déclenchement des expansions plus faible pour la RAG que pour la RSI (*Rust 2009*). Il est probable que les hypothèses que nous avons posées dans le raisonnement de la section 10.1.2.2 soient moins applicables dans ce cas en raison des plus faibles expansions de ce matériau. Ainsi, un calcul du degré de saturation sans prise en compte des expansions (cf. (3-32)) aboutit aux résultats présentés sur la Figure 3-89 et indiquent un seuil de l'ordre de 0,95. Cette valeur est comparable à celles obtenues pour les bétons R1 et R2 et semble indiquer des seuils de déclenchement comparables pour RSI et RAG. En l'absence d'investigations complémentaires plus précises, il apparaît difficile de conclure sur ce point.

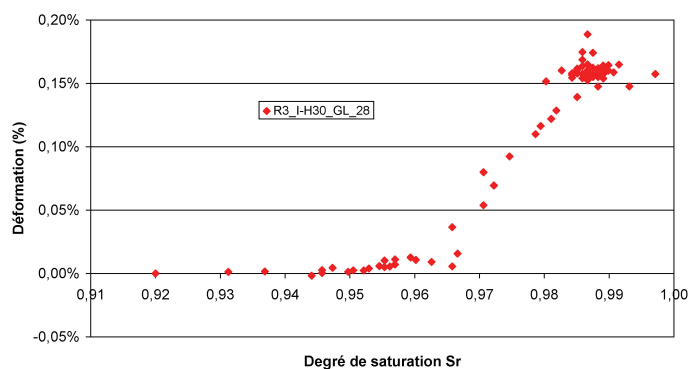


Figure 3-89 : couplage entre gonflement et degré de saturation sans prise en compte des prises de masse par expansion – formule R3

10.2.2.3 Influence de l'échéance de carottage des corps d'épreuve

La Figure 3-90 et la Figure 3-91 confrontent les suivis dimensionnels des éprouvettes carottées à 28 jours et à 90 jours soumises à une humidification tardive. En prenant en compte la dispersion des résultats, on constate que les amplitudes de gonflement sont comparables. En revanche, la diminution du temps de latence relativement marquée et systématique observée dans le cas des cylindres R1 et la stabilité du temps caractéristique ne semblent pas pouvoir se transposer au cas des corps d'épreuve NR et R2 (cf. Tableau 3-38).

En effet, dans le cas des corps d'épreuve NR, si la diminution du temps de latence est toujours observée, on constate néanmoins une variation du temps caractéristique qui augmente dans le cas des éprouvettes H30-I mais qui diminue dans le cas des éprouvettes S-I. Toutefois, on notera que le calage des paramètres de modélisation des gonflements libres s'est révélé délicat. Ainsi, la poursuite des suivis dimensionnels de ces corps d'épreuve pourra éventuellement conduire à une évolution de nos estimations permettant d'affiner nos conclusions.

Le cas des corps d'épreuve R2 est également singulier : en tenant compte de la dispersion des données, les gonflements libres observés dans les deux cas sont comparables. A l'inverse des hypothèses que nous avons formulées pour justifier le comportement du béton R1 lors d'une humidification tardive (cf. section 10.1.2.3), il semble que la différence d'échéance de carottage n'ait que peu d'influence dans ce cas précis. Par conséquent, l'hypothèse d'accélération des gonflements par microfissuration induite par le gonflement du bloc carotté à 90 jours semble ici moins probable. Ainsi, le matériau R2 semble se comporter de manière similaire qu'il soit conditionné sous forme de cylindre ou sous forme de bloc durant les 62 jours précédant le carottage des éprouvettes d'expansion résiduelle. Par ailleurs, cette conclusion met d'autant plus en cause la possibilité de la modification des cinétiques de gonflement par microfissuration initiale dans le cas de la formule R1 comme cela a été suggéré en section 10.1.2.3. Ainsi, des investigations complémentaires se révèlent effectivement nécessaires pour expliquer précisément les différences de comportement expansif observées pour des corps d'épreuve carottés à différentes échéances.

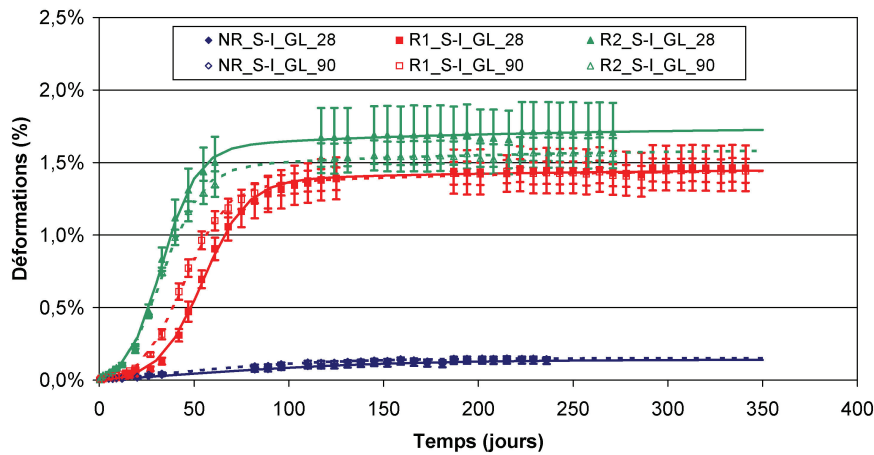


Figure 3-90 : suivis dimensionnels après recalage des éprouvettes de gonflement libre initialement protégées de la dessiccation – carottage à 28 jours et 90 jours

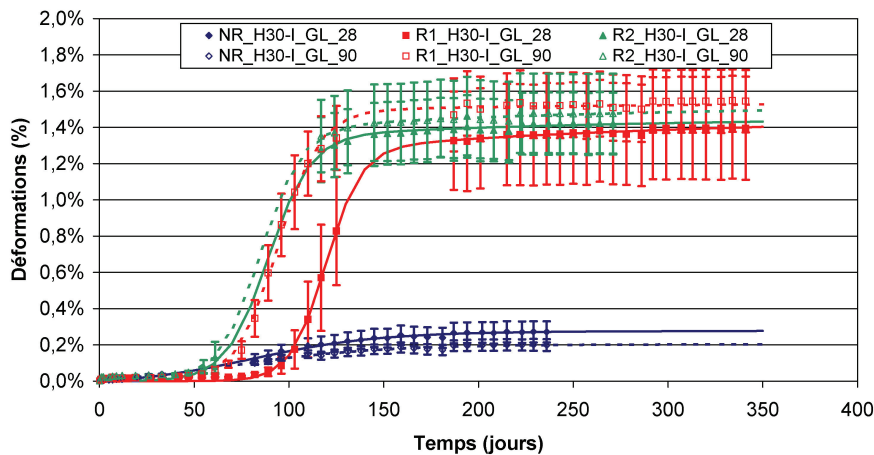


Figure 3-91 : suivis dimensionnels après recalage des éprouvettes de gonflement libre initialement soumises à un séchage à 30 % HR – carottage à 28 jours et 90 jours

Tableau 3-38 : calage des paramètres de modélisation des gonflements libre dans le cas d'une humidification tardive– effets de l'échéance de carottage

Formule	NR	NR	NR	NR	R1	R1	R1	R1	R2	R2	R2	R2
Conservation	S-I	S-I	H30-I	H30-I	S-I	S-I	H30-I	H30-I	S-I	S-I	H30-I	H30-I
Échéance de carottage (j)	28	90	28	90	28	90	28	90	28	90	28	90
ε_{∞}	0,14%	0,15%	0,29%	0,21%	1,49%	1,51%	1,54%	1,56%	1,79%	1,65%	1,51%	1,58%
τ_C (jours)	58	44	33	39	12	11	9	11	9	10	11	11
τ_L (jours)	33	26	79	66	54	44	119	94	32	32	89	85
ϕ (jours)	7	5	13	9	14	20	40	10	18	19	23	25
δ (jours)	90	99	90	90	119	120	111	119	120	120	119	119

11 Evaluation des couplages entre contraintes et gonflements

11.1 Introduction

Dans un ouvrage, les matériaux sont soumis à un champ de contraintes inhérent au fonctionnement de la structure. Ces efforts peuvent induire des effets d'anisotropie sur les expansions d'origine chimique (comme l'ont montré par exemple [Larive 1998, Smaoui 2003, Multon & Toutlemonde 2006]) qu'il convient d'évaluer afin de formuler des lois de couplages nécessaires au développement de modèles macroscopiques tels que ceux développées par (Li et al. 2004), (Grimal 2007) ou (Baghdadi 2008). Pour cela, des essais de gonflement sous divers état de contrainte ont été mis au point (cf. Chapitre 2). L'objectif est ici de caractériser les gonflements de cylindres dans les directions radiale et axiale, la comparaison de ces données pour différents cas de chargement permettant d'évaluer l'anisotropie intrinsèque et l'anisotropie induite des phénomènes.

Ces essais ont été réalisés sous scellement hydrique. Ce choix a été dicté par des raisons techniques : les essais de caractérisation des couplages entre humidité et expansions ont mis en évidence l'importance de l'eau dans le développement des expansions. Ainsi, un scellement hydrique se révélait être la protection minimale qu'il était possible d'envisager. Une immersion des corps d'épreuve aurait été probablement plus pertinente dans le cas de la RSI. Néanmoins, on se heurte dans ce cas à des difficultés de fiabilité dans le temps des moyens de chargement et de mesure. La réalisation d'essais en eau se révèle délicate en raison de la corrosion des pièces d'instrumentation et de chargement des corps d'épreuve. L'utilisation de pièces en acier inoxydable peut améliorer cet aspect mais induit un coût beaucoup plus important. Par ailleurs, l'immersion d'éléments tels que les vérins de chargement peut se révéler délicate. Une solution alternative peut consister en une immersion très « localisée » des corps d'épreuve avec des réservoirs indépendants pour chaque éprouvette. Si ceci se révèle moins agressif pour les dispositifs de chargement, l'étanchéité se révèle délicate à garantir surtout pour des durées prévisibles de 12 à 18 mois. En outre, de tels dispositifs doivent être démontés à chaque mesure d'expansion par un dispositif tel que le robot développé pour ces essais. Par ailleurs, le mode de chargement radial des éprouvettes induit l'utilisation d'anneaux métalliques constituant une bonne technique de protection vis-à-vis de la dessiccation. En cas d'immersion, ce type de dispositif constituerait en revanche une barrière à l'humidification.

Pour toutes ces raisons, le choix d'essais sous scellement hydrique a été réalisé. Malheureusement, le retour d'expérience que nous avons acquis aujourd'hui montre l'absence de gonflements dans ces conditions à « court » terme (durées d'essai de l'ordre de deux ans). Néanmoins, les investigations présentées ci-avant nous laissent penser que des gonflements à plus long terme pourraient se développer. Aussi, un prolongement des mesures a-t-il été engagé pour une durée d'au moins quatre ans. Les résultats correspondants ne peuvent donc être exploités dans ce mémoire.

La présente section décrit les résultats dont nous disposons actuellement. L'absence d'expansion de formules susceptibles de RSI dans ces conditions se révèle être un résultat en soi et pourra contribuer à l'avenir à définir de manière plus adéquate ce type d'essai.

11.2 Eprouvettes susceptibles de RSI – formule R1

La Figure 3-92 représente les suivis dimensionnels des éprouvettes de gonflement sous contraintes non chargées axialement. Après plus de 800 jours de suivi, on n'observe aucune expansion des corps d'épreuve. On note en revanche un retrait dans la direction axiale et dans la direction verticale. Ce retrait est cohérent avec une dessiccation des matériaux mise en évidence par les pertes de masse des corps d'épreuve (cf. Figure 3-93). On note sur cette figure la différence de comportement hydrique induite par l'utilisation des anneaux d'étreinte se comportant comme un pare-vapeur. Ainsi, le retrait des éprouvettes R1_L0T4_SC est logiquement moins important que celui des cylindres R1_L0T0_SC. Dans les deux cas, la contraction mesurée est moins importante que pour les éprouvettes de gonflement libre R1_S-I-GL_28 pour lesquelles un retrait de l'ordre de 0,04 % est évalué après 530 jours de suivi.

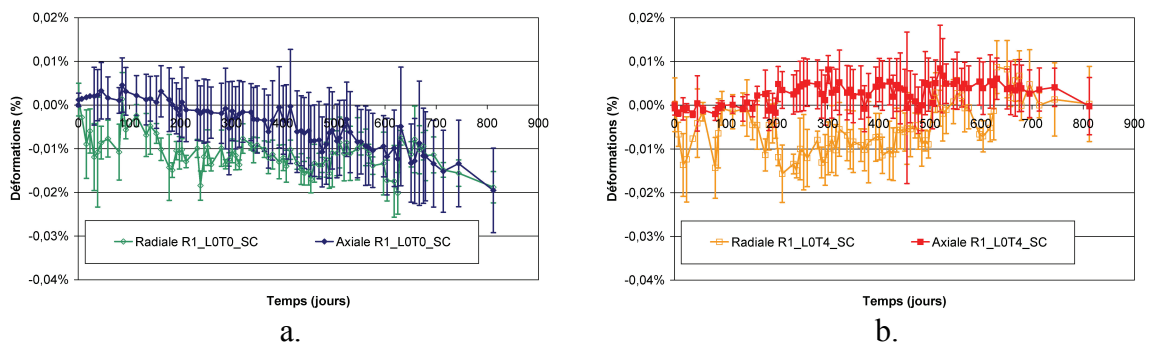


Figure 3-92 : suivis dimensionnels axiaux et radiaux des éprouvettes non chargées axialement (a. sans étreinte radiale ; b. avec étreinte radiale)

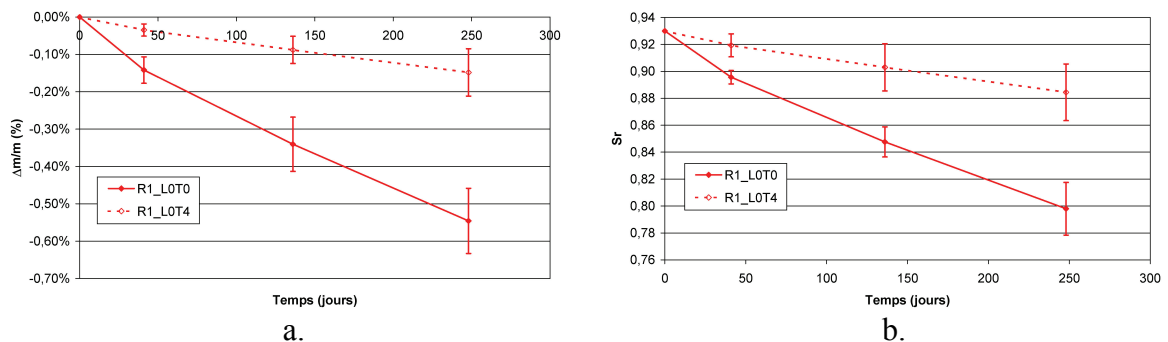


Figure 3-93 : suivi massique des éprouvettes R1_L0T. SC (a. variations relatives de masse ; b. degré de saturation)

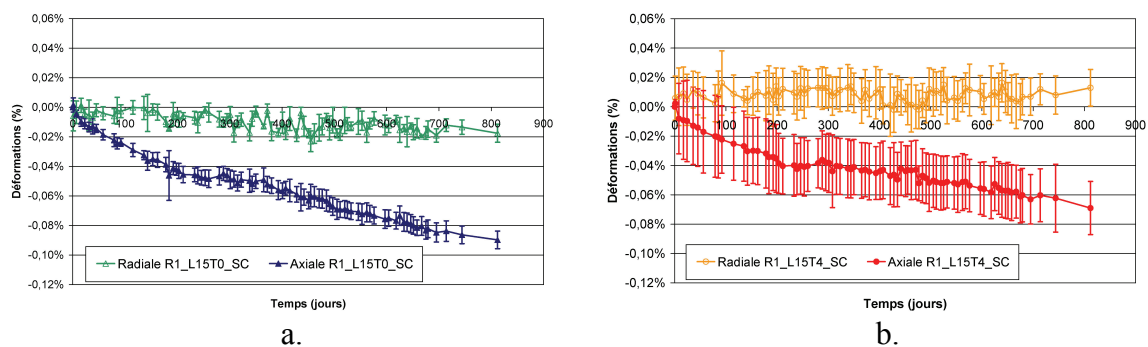


Figure 3-94 : suivis dimensionnels axiaux et radiaux des éprouvettes chargées axialement (a. sans étreinte radiale ; b. avec étreinte radiale)

La Figure 3-94 représente les suivis dimensionnels axiaux et radiaux des éprouvettes R1 chargées axialement. A l'image des éprouvettes libres axialement, on mesure un retrait du matériau dans la direction radiale. De la même façon, le retrait est plus important pour les éprouvettes non étreintes, caractérisant ainsi la meilleure protection à la dessiccation des anneaux métalliques.

Dans la direction axiale, on mesure logiquement un fluage du matériau. La présence d'anneaux d'étreinte ne semble pas influencer sur le fluage axial. Après plus de 800 jours de suivi, aucun gonflement n'est décelé.

Comme cela a été suggéré en section 3.3, il est probable que le cœur de ces corps d'épreuve soit maintenu à un niveau d'humidité élevé. Le calcul de degré de saturation moyen des éprouvettes R1 tel qu'il est présenté en section 10.1.2.2 indique des degrés de saturation de l'ordre de 0,88 et 0,80 après 250 jours de suivi pour les éprouvettes étreintes et non étreintes respectivement (les caractéristiques de calcul considérées sont celles présentées en section 10.1.2.2) : le degré de saturation à cœur est donc supérieur à ces valeurs. Ainsi, la possibilité de développer des expansions à long terme n'est pas à exclure. Afin de disposer de données expérimentales sur ce point, un suivi à long terme de ces corps d'épreuve a été mis en place.

11.3 Comportement des corps d'épreuve en fonction de leur réactivité

La Figure 3-95 représente les suivis dimensionnels des éprouvettes L15T4 (charge axiale 15 MPa, étreinte radiale par anneaux de 4 mm d'épaisseur) pour les formules de béton NR, R1 et R2. On note des déformations axiales et radiales similaires quelle que soit la réactivité du matériau considéré. Aucun gonflement n'a été mesuré.

Ainsi, on note des comportements similaires des trois formules. A ce stade des essais, aucun gonflement n'a pu être mis en évidence. Le suivi à long terme mis en place a pour objectif d'apporter des éléments de réflexion relatifs à la possibilité de développer des expansions en l'absence d'apport d'eau.

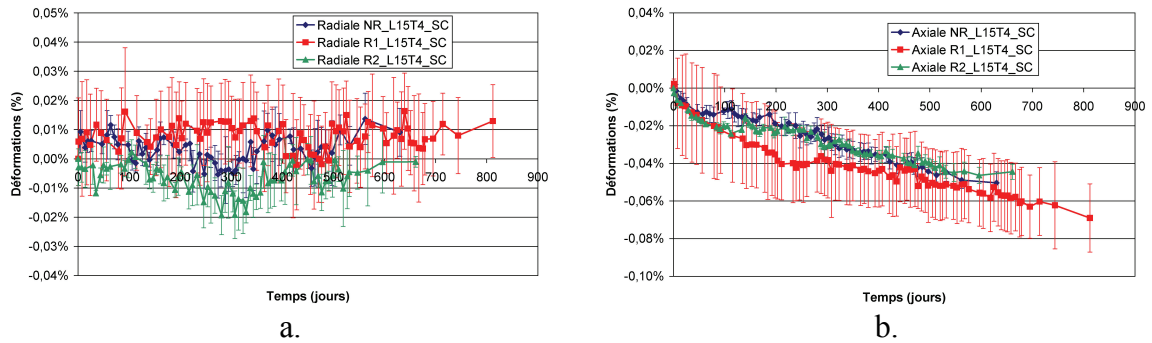


Figure 3-95 : suivis dimensionnels radiaux (a.) et axiaux (b.) des éprouvettes chargées axialement et étreintes

11.4 Suspensions d'expansion

La Figure 3-96 représente le suivi des déformations axiales des corps d'épreuve en gonflement libre (figure a.), sous étreinte radiale et non chargés axialement (figure b.) et sous chargement axial sans étreinte radiale (figure c.). Dans ces trois cas, on suspecte le développement d'expansion de la formule NR (cas L0T0), de la formule R2 (cas L0T4) ou de ces deux matériaux (cas L15T0).

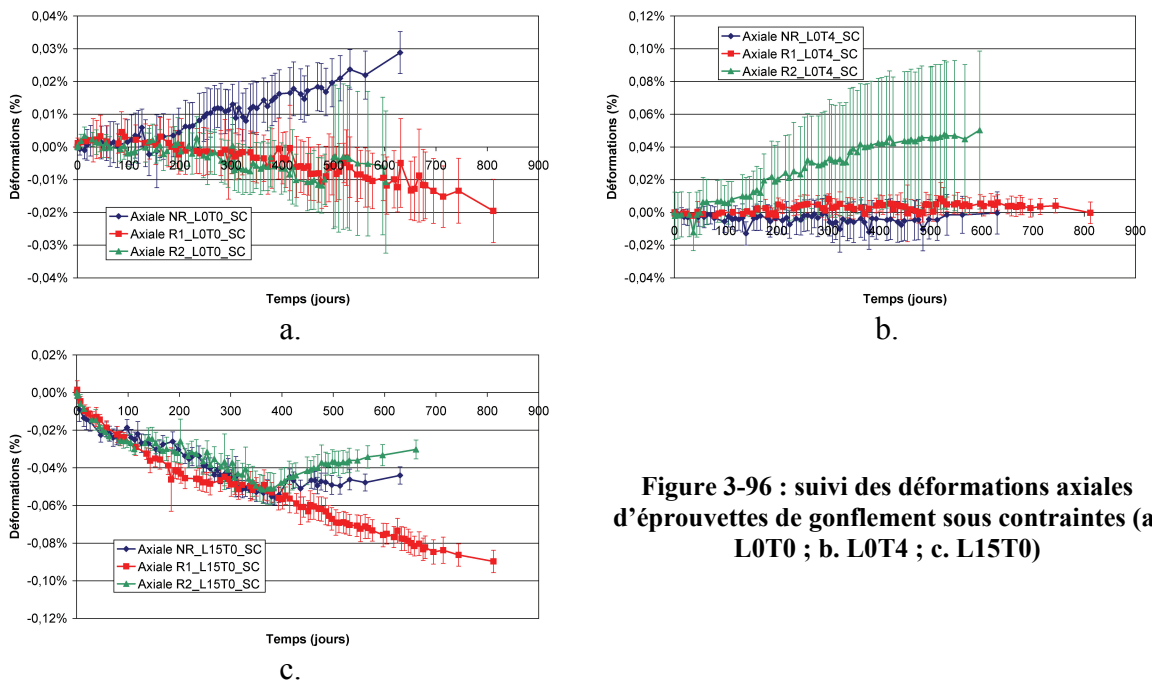


Figure 3-96 : suivi des déformations axiales d'éprouvettes de gonflement sous contraintes (a. L0T0 ; b. L0T4 ; c. L15T0)

Ces résultats semblent difficiles à interpréter à l'heure actuelle : en effet, le gonflement de la formule NR en l'absence de gonflement de la formule R1 n'apparaît pas cohérent avec l'analyse comparative des cinétiques d'expansion réalisée dans ce chapitre. Le cas L0T0 apparaît d'autant plus singulier que seule la formule NR semble développer des expansions. Pour le cas L15T0, les variations pourraient être expliquées par un déchargement non contrôlé du bâti de fluage. Néanmoins, les variations de déformation de l'ordre de 0,02 % correspondraient à une diminution de la charge appliquée de l'ordre de 6 MPa. Celle-ci ne semble pas concorder avec l'absence de fuite hydraulique significative pour ces systèmes de chargement.

Le cas des éprouvettes R2_L0T4 apparaît singulier : seule une éprouvette sur les quatre semble développer des expansions, ce qui explique l'écart type important et croissant au cours du temps.

En considérant l'existence d'un seuil d'humidité déclencheur des gonflements, on pourrait envisager que les matériaux se situent juste à la limite de la teneur en eau permettant le développement de la réaction. Ainsi, un séchage occasionnellement moins important des corps d'épreuve pourrait expliquer le développement d'expansions. Néanmoins, cette explication n'apparaît pas complètement satisfaisante dans la mesure où on suspecte des gonflements pour les éprouvettes L15T0 et non pour les corps d'épreuve L15T4. L'utilisation d'anneaux d'étreinte dans ce dernier cas assure un meilleur scellement des corps d'épreuve et devrait donc faciliter le développement d'expansions avant les corps d'épreuve non étreints, ce qui n'est pas observé expérimentalement.

11.5 Conclusions

La réalisation d'essais de gonflement sous contraintes n'a pas permis de mettre en évidence le développement d'expansions caractérisées et répétables. L'utilisation de scellements hydriques a été dictée par la faisabilité technique des expérimentations. Néanmoins, les résultats collectés à ce jour indiquent que des conditions d'exposition à une humidité plus importante se révéleraient nettement plus adaptées à l'étude des couplages entre état de contraintes et gonflements de RSI.

Le suivi des éprouvettes de gonflement sous contraintes n'a pas révélé d'expansion pour les éprouvettes R1 durant les 800 jours de suivi dimensionnel. Ce résultat est conforme aux mesures effectuées dans le cadre de l'étude des couplages entre humidité et expansions de ce chapitre. Il est suggéré que le cœur des corps d'épreuve ne soit que peu touché par le séchage des matériaux, laissant ainsi une possibilité de développer des expansions. La mise en place d'un suivi dimensionnel à long terme ambitionne de fournir des éléments objectifs de réflexion sur ce point.

Des suspicions de gonflements ont été mises en évidence pour certains corps d'épreuve et appuient donc cette volonté de suivi à long terme. Néanmoins, les résultats partiels disponibles à l'heure actuelle se révèlent délicats à interpréter. La poursuite des suivis se révèle donc nécessaire pour conclure sur ces points.

On trouvera en Annexe 6 une synthèse exhaustive des résultats actuels des mesures obtenues pour ces essais de gonflement sous contraintes.

12 Conclusions

Le présent chapitre avait pour objectif l'étude des couplages existant entre les conditions d'exposition à l'humidité d'un matériau et les expansions que celui-ci peut développer sous les effets d'une Réaction de Gonflement Interne (RSI ou couplage RSI-RAG). Pour cela, des essais de gonflement libre ont été réalisés à l'aide de cylindres carottés pour lesquels un suivi dimensionnel et un suivi massique ont été mis en place de façon systématique. Différentes conditions d'exposition à l'humidité ont été mises en œuvre. On trouvera en Annexe 5 une synthèse exhaustive des résultats et des calages de paramètres présentés dans cette section.

Les formules R1 et R2 ont bien développé les expansions importantes attendues, sous réserve d'une humidité suffisante et supérieure à la saturation atteinte « naturellement » en l'absence d'échanges hydriques.

La formule NR a développé des expansions contrairement à ce qui était attendu, ce qui a motivé des mesures complémentaires sur un béton témoin réellement non réactif.

Pour les trois formules de béton NR, R1 et R2, on observe une amplification de l'amplitude des gonflements de RSI quand on passe de la condition H100 à la condition I. Cette conclusion est concordante avec les conclusions de (Multon 2004) dans le cadre de son étude de la RAG (cf. Figure 3-97.a).

Par ailleurs, on note une augmentation du temps caractéristique des gonflements (cf. Figure 3-97.b) des corps d'épreuve conservés à 100 % HR par rapport à ceux immergés. Si pour R1 et R2 elle n'est pas nécessairement très significative étant donné la faible valeur de ces paramètres, cet effet semble plus marqué pour la formule NR et le matériau réactif vis-à-vis de la RAG de (Multon 2004) (cf. Tableau 3-39). Ce ralentissement de la vitesse d'expansion du matériau une fois les gonflements initiés peut s'expliquer par une moins grande quantité d'eau liquide dans le matériau limitant les réactifs disponibles d'une part et diminuant la mobilité de ceux-ci d'autre part.

Enfin, pour les matériaux de cette étude, on observe une augmentation du temps de latence lors d'une conservation des corps d'épreuve dans une atmosphère à 100 % HR (cf. Figure 3-97.c). Ce phénomène peut s'expliquer, d'une part par un apport d'eau liquide plus important utile autant en tant que réactif qu'en tant que moyen de transport de ceux-ci pour la formation d'ettringite, et d'autre part par une lixiviation des alcalins plus conséquente favorisant la désorption des sulfates mobilisés par les CSH durant la cure thermique (Divet & Randriambololona 1998). Au contraire, (Multon 2004) met en évidence un effet inverse sur le temps de latence de la réaction alcali-silice. La lixiviation des alcalins peut également expliquer cet effet : elle induit une diminution de réactifs dans les matériaux et ralentit donc les expansions.

Tableau 3-39 : synthèse des paramètres de modélisation des gonflements libres – éprouvettes carottées à 28 jours

Formule	NR	NR	R1	R1	R2	R2	(Multon 2004)	(Multon 2004)
Conservation	I	H100	I	H100	I	H100	I	H100
ϵ_{∞} RSI	0,34%	0,19%	1,58%	1,31%	1,55%	1,24%	0,25 %	0,17 %
τ_C RSI (jours)	29	48	11	13	9	9	27	41
τ_L RSI (jours)	92	100	83	89	62	66	68	53
ϕ (jours)	54	30	18	18	15	26	-	-
δ (jours)	84	88	120	120	120	119	-	-

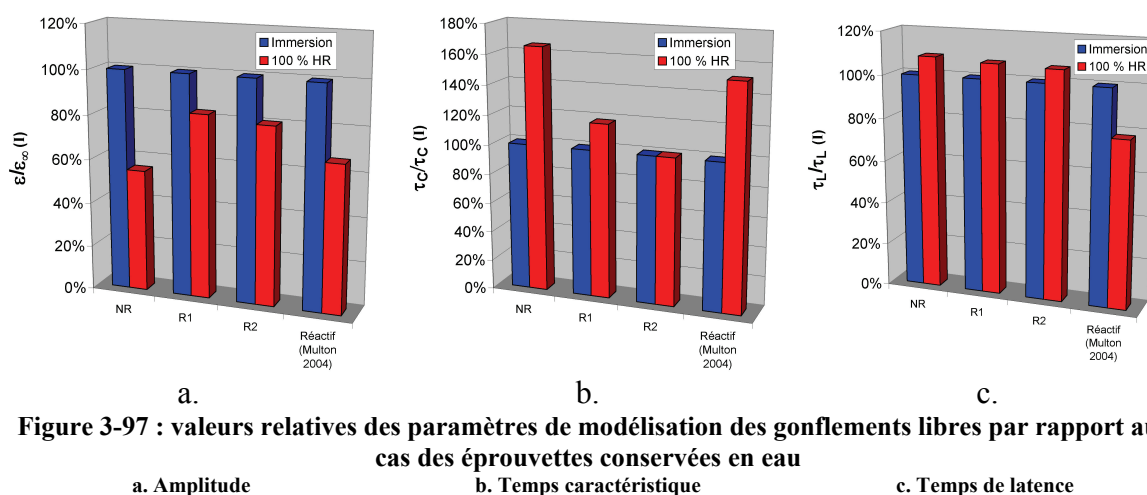


Figure 3-97 : valeurs relatives des paramètres de modélisation des gonflements libres par rapport au cas des éprouvettes conservées en eau

a. Amplitude

b. Temps caractéristique

c. Temps de latence

Une analyse des suivis massiques en fonction des suivis dimensionnels indique l'existence d'une relation affine entre déformation axiale et variation relative de masse, quelle que soit la réactivité du matériau considéré. A l'exception de la formule NR qui montre un comportement particulier dans le cas d'une expansion (attribué au changement de ciment pour cette formule), on observe une pente gonflement / variation relative de masse similaire, quel que soit le type de réaction de gonflement envisagée (RSI ou RSI+RAG) et le mode de conservation de l'éprouvette (immersion ou 100 % HR, 20°C ou 38°C). Il est donc suggéré que la prise de masse observée lors du gonflement soit essentiellement le résultat du remplissage par l'eau des fissures créées par les expansions. Une analyse détaillée des données confrontant les estimations de gonflement volumique sur la base des suivis massiques et des suivis dimensionnels semble indiquer que durant la phase de gonflement intense caractérisant les phénomènes sigmoïdes typiques des RGI, cette hypothèse de prise de masse par remplissage des fissures nouvellement créées est vérifiée.

Pour les trois matériaux NR, R1 et R2, aucun gonflement n'a été observé lorsqu'ils sont soumis à un séchage sévère dans une atmosphère à 30 % HR. L'estimation des profils de séchage dans ces conditions a montré que le cœur des corps d'épreuve est rapidement touché par le front de perte de masse, conduisant à un blocage de la réaction par manque d'eau.

Par ailleurs, aucune expansion n'a pu être décelée après 538 jours de suivi des corps d'épreuve protégés de la dessiccation par scellement hydrique, contrairement aux résultats mis en évidence pour la RAG par (Multon 2004). Il est supposé que la thermoactivation de l'hydratation durant la cure thermique ait conduit à une autodessiccation plus prononcée des matériaux et limite ainsi davantage les possibilités d'expansion (la saturation initiale des matériaux avoisine 0,9). Néanmoins, il reste difficile de conclure si l'absence de gonflement est liée à un effet de cinétique plutôt qu'à une impossibilité de développer la réaction. En effet, l'évaluation de profils de perte de masse semble indiquer que le séchage n'a que très peu affecté le cœur des éprouvettes. En d'autres termes, des gonflements pourraient se déclarer pour ces corps d'épreuve à plus long terme, à l'instar de ce qui pourrait se produire sur des ouvrages massifs soumis à des échanges hydriques très lents. Néanmoins, il n'est pas possible dans l'état actuel des choses de quantifier la période qu'il serait nécessaire d'attendre pour voir apparaître les premières expansions. Toutefois, la diminution substantielle du temps de latence lors de l'humidification tardive de ces corps d'épreuve en comparaison aux phénomènes observés

lors d'une humidification précoce (corps d'épreuve référencés I-H30_GL_28) semble confirmer qu'une partie du mécanisme réactionnel a été initiée lors de la première phase des expérimentations.

La comparaison des suivis dimensionnels et massiques en l'absence d'apport d'eau indique d'ailleurs que les critères fixés par le cahier des charges de formulation des bétons (cf. Chapitre 2) sont respectés : la similarité des profils de perte de masse et de déformation malgré les variations de composition entre les matériaux tend à confirmer que les bétons ont des propriétés d'échange comparables.

Dans nos conditions expérimentales spécifiques (traitement thermique de trois jours à 80°C et conservation à 38°C), le suivi de corps d'épreuve susceptibles de RSI et de RAG suggère que le développement de RAG durant la cure thermique (thermoactivation) soit un initiateur de la RSI lors de la phase de vieillissement du matériau (des premiers éléments pouvant étayer cette hypothèse ont été présentés ; néanmoins, une caractérisation microscopique complémentaire de l'évolution de la microstructure initiale des matériaux permettrait de préciser ce point). Cet effet déclencheur peut comporter une origine mécanique en créant une microfissuration favorable au développement de RSI (cf. Chapitre 1) mais également une origine chimique en consommant des alcalins pour la formation de gel et donc en favorisant la précipitation d'ettringite. Toutefois, il convient de garder à l'esprit que la modification d'un paramètre expérimental (en particulier un paramètre thermique) peut conduire à une modification radicale de l'ordre et de l'importance relative des différents mécanismes expansifs (les deux réactions sont en effet thermodépendantes mais pas de façon identique).

Le cas du matériau R2 conservé dans une atmosphère à 100 % HR a mis en évidence un comportement singulier conduisant à développer des gonflements plus importants que dans le cas d'une immersion, résultat inattendu à la lumière de l'étude de la RSI déjà menée dans ces travaux ou de celle de la RAG de (*Multon 2004*). Afin d'expliquer ce phénomène, un mécanisme a été proposé. Il est principalement basé sur des hypothèses relatives à la cinématique de la RAG par rapport à la RSI et à la lixiviation. Un modèle permettant de reproduire les gonflements libres dans ces conditions expérimentales a été formulé. Afin de s'assurer de la pertinence des hypothèses formulées, des essais de caractérisation du potentiel de gonflement de RAG du matériau R2 d'une part et de caractérisation de la lixiviation des alcalins en fonction des conditions d'exposition des corps d'épreuve d'autre part ont été réalisés. Les premiers essais ont mis en évidence les difficultés inhérentes au découplage chimique et mécanique de la RAG et de la RSI dans un matériau susceptible de développer les deux pathologies. Les seconds essais confirment que les matériaux immergés sont soumis à une lixiviation des alcalins plus importante que lors d'une exposition à une atmosphère saturée. Néanmoins, dans ce dernier cas, la diminution de la teneur en alcalins est loin d'être négligeable.

Si ces premiers essais ont apporté des premiers éléments de réflexion sur les hypothèses que nous avons formulées, ils nécessitent néanmoins d'être complétés, notamment pour caractériser plus finement le potentiel de RAG d'une formule mixte RSI-RAG. Par ailleurs, la problématique des couplages entre ces deux réactions mériterait d'être étudiée dans des domaines de traitement thermique et de conditions de conservation plus vastes. En tout état de cause, il semble difficile de modéliser une structure atteinte à la fois de RSI et de RAG en utilisant une courbe unique de gonflement imposé.

La mise au point d'une formule de béton ne développant pas de gonflement malgré l'application d'une cure thermique sévère en utilisant un ciment CEM I PM ES pauvre en sulfates, en aluminates et en alcalins s'est soldée par un échec. En effet, même si les

amplitudes et les cinétiques de gonflement ont été considérablement réduites (cf. Tableau 3-39), les phénomènes expansifs mesurés restent très significatifs (0,3 % en 12 mois) et peuvent induire des effets fortement délétères pour un ouvrage. Ceci confirme la nécessité de ne pas se limiter à l'analyse de la seule composition du matériau et de caractériser le couple formule de béton/traitement thermique quand il s'agit d'évaluer le risque de RSI (Kretz *et al.* 2007).

La fabrication d'une formule de béton « témoin » ne développant aucune expansion a été obtenue en utilisant le matériau NR sans application de cure thermique. Si l'absence de gonflement a été confirmée, un tel procédé expérimental conduit également à la fabrication de matériaux dont la microstructure est différente. En effet, la confrontation des suivis massiques montre une différence de comportement attribuable à la modification de la porosité par l'application de la cure thermique.

L'application d'un séchage tardif sur des matériaux ayant déjà développé des expansions a mis en évidence une modification du comportement de contraction hydrique. Cette modification a été attribuée à une fissuration plus importante conduisant à une évolution des propriétés de transfert. Par ailleurs, ces essais ont également pu mettre en évidence la grande irréversibilité chimique des gonflements de RSI.

Le cas d'une humidification tardive a permis de mettre en évidence la subsistance du potentiel de gonflement malgré l'exposition des matériaux à des conditions hydriques bloquant le développement de la pathologie. Dans le cas d'éprouvettes conservées dans un premier temps sous scellement, le développement d'expansions est très rapide, indiquant qu'une partie de la réaction a été initiée durant la première phase des essais. En revanche, les matériaux soumis initialement à un séchage sévère mettent plus de temps à développer des gonflements : il est nécessaire dans un premier temps de réhydrater suffisamment le matériau pour permettre le développement de gonflements. En termes de prise de masse au cours des gonflements, l'analyse des données effectuées est en accord avec celle effectuée pour une humidification précoce.

Le mode de préparation des échantillons (moulage, carottage à différentes échéances) s'est révélé être un paramètre non négligeable sur la valeur des gonflements mesurés. Les différentes techniques expérimentales ne semblent pas influencer grandement sur la dispersion intrinsèque des résultats au sein d'un même groupe de corps d'épreuve. En revanche, en modifiant les cinétiques et les amplitudes de gonflement, la technique choisie par l'expérimentateur modifie les résultats obtenus. Si des investigations complémentaires sont nécessaires pour affiner les premières conclusions issues de nos essais, la meilleure solution dans l'état actuel de nos connaissances consiste à utiliser des techniques expérimentales les plus représentatives des phénomènes que l'on souhaite étudier afin de réaliser des études de laboratoire qui soient les plus proches possibles de la réalité. Ainsi, d'une manière générale, les expansions estimées à l'aide de corps d'épreuve carottés conduisent à des résultats plus sécuritaires (gonflements plus élevés par rapport à des éprouvettes moulées). Par ailleurs, la réalisation d'essais d'expansion résiduelle dans un objectif de re-calcul semble plus pertinente à 100 % HR (ou dans des volumes d'eau restreints comme le préconisent [Pavoine & Divet 2009]) : en limitant la lixiviation des alcalins, cet essai conduit probablement à des résultats plus représentatifs des phénomènes ayant lieu au sein de structures de dimensions importantes pour lesquelles la lixiviation est beaucoup moins rapide que pour des cylindres de taille réduite.

Cette partie du programme expérimental a mis en évidence une correspondance entre les gonflements et les prises de masse : sauf pour des matériaux de porosité importante siége d'un remplissage des vides par l'ettringite, le gonflement au delà de 1 % semble correspondre à une augmentation du volume poreux se remplissant d'eau au fur et à mesure de sa formation. Ceci implique une modification du comportement hydrique du matériau durant la phase d'expansion qu'il convient très probablement de prendre en compte dans les méthodes de re-calcul : en effet, ceci induit une modification des cinétiques de transfert hydrique ; devant les couplages marqués mis en évidence entre gonflements et humidité, il apparaît important de prendre en compte ces effets. Ceci induit un couplage entre le calcul de diffusion hydrique au sein des structures et le calcul mécanique correspondant, augmentant ainsi par la même occasion la complexité du problème. En effet, de tels couplages ne se sont pas révélés nécessaires à intégrer dans des modélisations des effets de la RAG tels que ceux de (*Li et al. 2004*) ou (*Grimal 2007*).

Les cas de séchage ultérieurs au développement d'expansion ont mis en évidence l'irréversibilité des expansions d'une part et la modification des propriétés mécaniques et de transfert vis-à-vis de la dessiccation. Ainsi, de tels effets pourraient être intégrés également aux modèles de re-calcul et pourraient se révéler particulièrement nécessaires dans le cas de structures soumises à des cycles d'humidification-séchage telles que des piles de pont en zone de marnage par exemple.

Le cas de la concomitance entre RSI et RAG a montré qu'en fonction de la quantité d'alcalins disponibles dans le matériau et de la température d'exposition, les couplages entre ces deux pathologies évoluent. La modélisation des gonflements libres proposée comme une addition de deux déformations chimiques imposées apparaît assez simple à intégrer dans un outil de re-calcul tel que RGIB (*Baghdadi 2008*). Néanmoins, le calage de cette loi reste pour l'instant délicat ; en particulier, des investigations complémentaires sur son domaine d'application en fonction de la température et de la lixiviation des alcalins se révèlent nécessaires pour améliorer notre compréhension de ces couplages complexes. Ainsi, il pourrait se révéler utile à terme d'intégrer aux outils de re-calcul une analyse de la lixiviation des alcalins dans les structures atteintes afin d'affiner la réponse des modèles développés.

La comparaison des expansions et des degrés de saturation correspondants semble mettre en évidence l'existence d'un seuil nécessaire au développement des expansions. Ceci conforte les données disponibles dans la littérature (*Graf 2007, Rust 2009*) ne mettant en évidence aucune expansion pour des humidités relatives d'exposition trop faibles.

Le seuil évalué pourrait correspondre à un degré de saturation de 0,93 à 0,95 qui pourrait se rapprocher d'un seuil de percolation de l'eau liquide au sein du réseau poreux

Le calcul du degré de saturation s'est révélé cependant relativement délicat : les fortes prises de masse liées au développement des gonflements conduisent à une intrusion d'eau qui n'est pas directement responsable de l'augmentation de la saturation du matériau. Ainsi, en régime d'expansion, il a été nécessaire de « corriger » les prises de masse mesurées de celles correspondant à une entrée d'eau liée à l'ouverture d'espaces poreux sous l'effet des expansions. Ceci implique nécessairement des incertitudes sur le résultat final qu'il ne nous a pas été possible de quantifier à la lumière de nos résultats. En outre, la mesure du degré de saturation initiale s'est également révélée être un paramètre particulièrement sensible dans le cadre de cette approche.

Enfin, les résultats de suivi des gonflements des éprouvettes soumises à un état de contrainte sont décrits dans ce chapitre pour une durée d'essai d'environ deux ans. Les

contraintes techniques inhérentes à ces essais ont porté notre choix sur la réalisation d'essais sous scellements hydriques. Conformément à notre analyse des couplages entre humidité et gonflements, il apparaît que cette technique expérimentale n'est pas la plus adaptée : en effet, l'absence d'apport d'eau liquide n'a pas permis le développement d'expansions dans un délai suffisamment court. Néanmoins, l'estimation des degrés de saturation dans ces corps d'épreuve (proches des seuils de déclenchement des réactions que nous avons pu identifier) laisse penser que l'absence de gonflements pourrait être le résultat d'un effet de cinétique et non d'une « impossibilité chimique ». Ainsi, un suivi à long terme a été mis en place et ambitionne de fournir à l'avenir des éléments de réponse quantifiés quant à la possibilité de développer des expansions en l'absence d'apports d'eau.