

Dans l'état actuel de l'avancement du programme expérimental, il nous apparaît délicat d'étudier ce cas de figure sans introduire de nouvelles hypothèses qui conduiraient à l'estimation de résultats dont la précision pourrait difficilement être évaluée. La poursuite du programme expérimental et les éventuelles investigations complémentaires devront permettre de compenser ce manque pour faciliter l'exploitation des données expérimentales issues de la phase de remouillage.

2 Comportement mécanique des poutres non armées

La présente section synthétise les résultats des suivis dimensionnels locaux et globaux des structures non armées soumises à un gradient hydrique imposé par un séchage à 30 % HR / 38°C de la face supérieure et une humidification par immersion des 7 cm inférieurs des corps d'épreuve. Après avoir analysé le comportement mécanique expérimental de ces structures, une analyse mécanique de ces corps d'épreuve dans le cadre de la théorie des poutres est proposée.

D'une manière générale, les données présentées correspondent à celles qui ont pu être traitées dans le cadre de ces travaux. En particulier, les difficultés rencontrées pour la mise en œuvre d'extensomètres à corde vibrante n'ont permis de disposer que des données relatives à la poutre P2 au moment de la rédaction du présent manuscrit.

2.1 Suivis dimensionnels de la poutre fortement réactive vis-à-vis de la RSI

2.1.1 Déformations dans la direction verticale

2.1.1.1 Mesures internes par jauges noyées

La Figure 4-19 représente les suivis dimensionnels verticaux réalisés à l'aide des jauges pain de sucre noyées dans la poutre P2 au moment du coulage. La jauge située à 0,37 m de profondeur a permis de réaliser des mesures durant environ 215 jours. La jauge disposée à 0,08 m de profondeur est quant à elle restée en bon état de fonctionnement durant les 330 jours de vie du corps d'épreuve (cf. section 2.4). Il convient par ailleurs de garder à l'esprit que ces jauges d'une longueur de base de 100 mm induisent nécessairement une intégration des déformations réelles dans cette direction : la partie inférieure de la jauge est située dans un béton plus humide que la partie supérieure de par l'existence du gradient hydrique. Ainsi le gonflement réel du matériau en ces deux points est différent. Les résultats issus de ces mesures constituent donc une moyenne des déformations réelles.

Etant donné le mode d'exposition de corps d'épreuve (gradient hydrique vertical, absence d'armatures), les gonflements dans la direction verticale sont a priori libres de toute contrainte. Ainsi, la confrontation de ces mesures locales aux résultats d'un essai de gonflement libre sur un matériau identique (en l'occurrence les essais R1_GL_28_I-H30) permet de se faire une idée du degré d'avancement de la réaction à une date donnée. Ainsi, on observe qu'après 200 jours d'exposition, seul environ 10 % du potentiel de gonflement libre est développé à une profondeur de 0,37 m. Ce même niveau est atteint à 0,08 m de profondeur après 330 jours d'exposition (cf. Figure 4-19.b), indiquant le développement de gonflements y compris dans ces parties élevées de la structure. Ce décalage des cinétiques

de gonflement confirme bien la création d'un gradient de gonflement par l'application d'un gradient hydrique : les parties inférieures du corps d'épreuve, plus humides car plus proches de la zone imbibée, développent des gonflements de manière plus précoce que dans la partie supérieure, résultat conforme à nos attentes.

Durant les 70 premiers jours, on mesure un retrait (maximum de l'ordre de 0,01 % après environ 50 jours) en partie supérieure. Ce phénomène n'est quasiment pas observé à une profondeur de 0,37 m. Ceci implique donc qu'il s'agit d'un retrait de séchage. Cette observation est conforme aux mesures de gammadensimétrie qui font état d'une perte de masse de l'ordre de 0,2 % à 0,09 m de profondeur après 50 jours d'exposition.

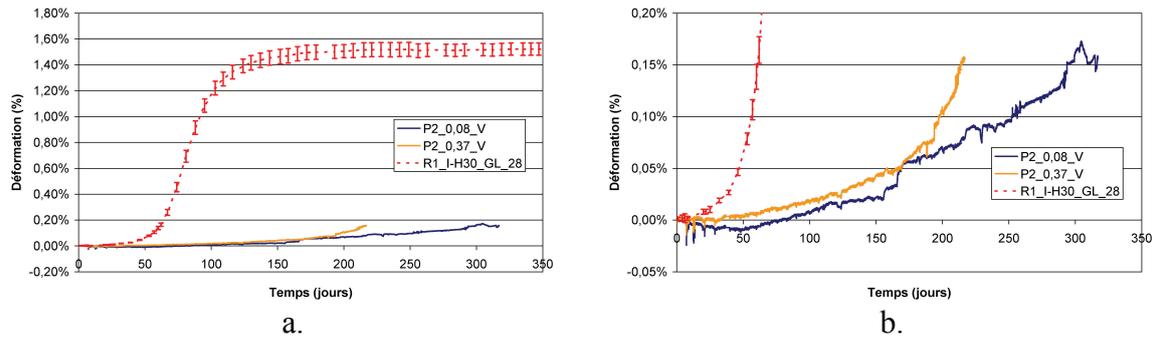


Figure 4-19 : suivi des déformations verticales locales de la poutre P2 et comparaison au suivi dimensionnel en gonflement libre (a. vue générale ; b. zoom)

La Figure 4-20 compare les profils de déformation verticale dans la structure en fonction des profils hydriques déterminés à l'aide des modèles définis dans les sections 1.4.1.2.3 et 1.4.1.2.4. La Figure 4-20.a illustre les imperfections des deux modèles (cf. section 1.4.1.2.5) : d'une part, le modèle de comportement hydrique binaire conduit à une sous estimation de la profondeur du front d'imbibition (le front d'imbibition est estimé dans les 7 cm immergés du corps d'épreuve durant plus de 150 jours) ; d'autre part, le modèle de comportement hydrique de gonflement libre pondéré conduit à une progression beaucoup plus rapide du front d'imbibition mais avec un gain de masse beaucoup plus faible. Ainsi, après 215 jours, le front d'imbibition est estimé avoir presque atteint le front de séchage ce qui semble difficilement envisageable étant donné les déformations mesurées dans la structure (réaction relativement peu avancée).

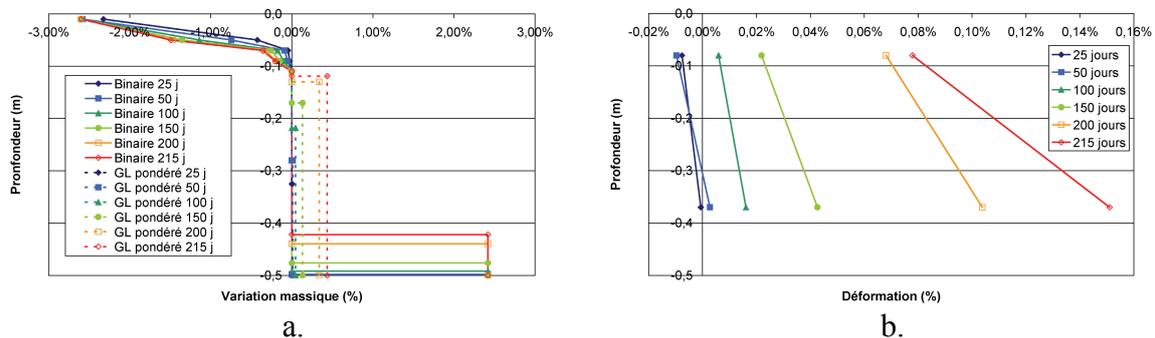


Figure 4-20 : évolution comparée des profils hydrique (a.) (modèles « binaire » et « gonflement libre modifié ») et de déformation verticale (b.) de la poutre P2

Le modèle de comportement hydrique binaire estime que le front d'imbibition est situé au voisinage du capteur inférieur après environ 200 jours. A cette échéance, on note une accélération des gonflements en ce lieu qui semble donc cohérente. Néanmoins à 315 jours, le front d'imbibition est estimé être à une profondeur de 0,32 m. Or, à cette échéance, on observe un gonflement de l'ordre de 0,15 % à 0,08 m de profondeur. Même si

une microfissuration du matériau en ce point et la possibilité de développer des gonflements avec un faible apport d'eau pourraient potentiellement expliquer le développement d'expansions, la distance du front d'imbibition semble néanmoins relativement éloignée pour justifier de tels gonflements.

En revanche, le modèle de comportement hydrique de gonflement libre pondéré de la cinétique d'imbibition globale de la poutre montre une progression beaucoup plus rapide du front de remontée capillaire mais avec un gain de masse a priori faible par rapport à la réalité. Toutefois, la progression du front d'imbibition semble plus cohérente avec la détection d'expansion à une profondeur de 0,08 m : à une échéance de 250 jours (dernière échéance de calcul avant pénétration de la zone imbibée dans la zone séchée, cf. 1.4.1.2.4), la position du front est estimée à une profondeur d'environ 0,1 m ce qui semble cohérent avec les déformations verticales en partie supérieure de la poutre à cette échéance. Toutefois, devant la progression rapide du front d'imbibition, ce modèle suggère une évolution a priori plus rapide et plus importante des expansions en partie basse, l'eau étant apportée plus rapidement dans cette zone.

Enfin, ces modèles hydriques permettent difficilement d'expliquer en totalité les suivis dimensionnels locaux dans la direction verticale. Une telle confrontation permet néanmoins de réaliser une première évaluation des hypothèses que nous avons formulées dans notre approche. Ceci confirme par ailleurs le besoin de données hydriques précises pour expliquer plus en profondeur les expansions développées dans ce type de structure.

Enfin, les mesures dimensionnelles externes globales dans la direction verticale par cordes vibrantes (cf. Annexe 1) n'ont pas permis d'obtenir des données fiables malgré toutes nos précautions (cf. Chapitre 2). Ainsi, il n'est pas possible ici de confronter les mesures dimensionnelles locales aux mesures dimensionnelles globales comme cela a pu être réalisé dans (*Multon 2004*).

2.1.1.2 Mesures externes par cordes vibrantes

La Figure 4-21 représente les suivis des déformations verticales locales de la poutre P2 à l'aide des extensomètres à corde vibrante. La forme générale de l'évolution des déformations dans cette direction et à différentes hauteurs est similaire à celle présentée en section 2.1.1.1. Néanmoins, on note que ces mesures ne mettent pas en évidence le retrait de séchage mis en évidence en partie haute à l'aide des jauges noyées. En outre, les déformations mesurées à l'aide des extensomètres externes sont sous estimées par rapport aux mesures internes. Il apparaît difficile dans l'état actuel de nos investigations d'expliquer ce phénomène. Néanmoins, il est d'ores et déjà possible d'indiquer que les caractéristiques mécaniques des matériaux en surface et à cœur sont différentes en raison de la moins grande densité de granulats au niveau de la peau du corps d'épreuve (*Sedran & de Larrard 1994*).

La mesure de déformation à 0,37 m de profondeur apparaît plus perturbée que celle présentée en section 2.1.1.1. Un tel comportement pourrait être expliqué par la formation de fissures en partie basse au cours des expansions : chaque ouverture de fissure peut conduire à un « relâchement » local des contraintes et pourrait donc induire ces sauts de déformation.

Enfin, l'analyse des profils de déformation suivant la hauteur de la poutre met en évidence son caractère fortement non linéaire en partie basse. Ce résultat est cohérent avec une progression très localisée du front d'imbibition (telle qu'elle est suggérée par le

modèle de comportement hydrique binaire) permettant le développement d'expansions en partie basse par opposition à la partie haute non (ou peu) soumise à des apports hydriques.

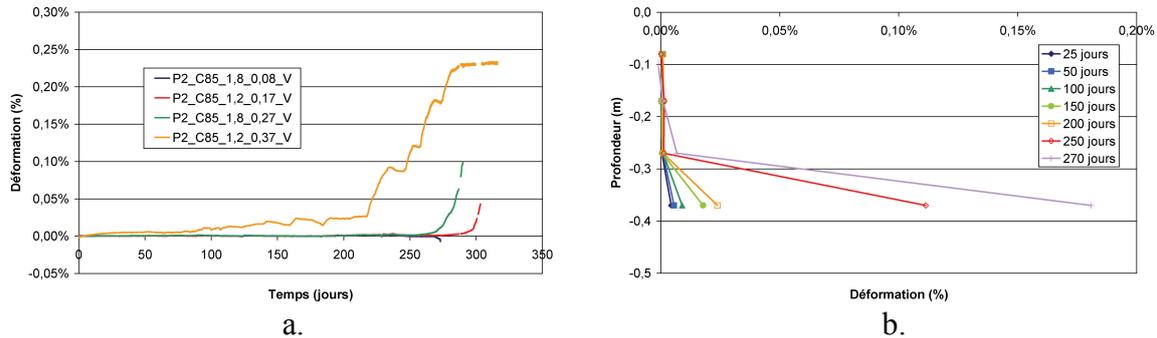


Figure 4-21 : suivi des déformations verticales locales de la poutre P2 par extensomètres à cordes vibrantes (a. suivi temporel ; b. profils de déformation)

2.1.2 Déformations dans la direction transversale

2.1.2.1 Mesures internes par jauges noyées

La Figure 4-22 représente le suivi des déformations transversales locales de la poutre P2 en fonction de la hauteur à l'aide des jauges noyées dans la poutre. L'ensemble des jauges disposées dans cette direction a fonctionné jusqu'à la rupture du corps d'épreuve.

La confrontation de ces mesures aux expansions évaluées lors de la réalisation d'un essai de gonflement libre montre que les déformations mesurées restent bien inférieures au potentiel expansif du matériau. On gardera néanmoins à l'esprit que les mesures des essais de gonflement libre et celles réalisées transversalement sur poutres sont effectuées respectivement parallèlement et perpendiculairement à la direction de coulage. Ainsi, un effet d'anisotropie intrinsèque n'est pas à exclure (*Baghdadi 2008*). Toutefois, les théories postulant l'isotropie des gonflements (au moins dans une première phase de gonflement – cf. Chapitre 1) et les résultats de la présente étude (cf. section 2.1.4) laissent penser que si un tel effet est avéré, son importance ne conduirait certainement pas à des écarts d'amplitudes tels que ceux notés entre mesures sur poutres et éprouvettes de gonflement libre sur la Figure 4-22.b. Ces différences sont donc plus probablement imputables au couplage humidité/gonflement et à la présence d'eau plus ou moins abondante en fonction de la hauteur de la poutre d'une part et au couplage contrainte/gonflement inhérent au fonctionnement mécanique de la structure d'autre part (schématiquement, l'expansion de la partie inférieure du corps d'épreuve riche en eau est gênée par les gonflements plus faibles de la partie supérieure).

Tout comme pour les mesures dans la direction verticale, on note un retrait en partie supérieure (amplitude et cinétique comparables aux mesures effectuées dans la direction verticale). Ce retrait est là encore moins marqué en partie basse de la structure. L'application d'un gradient hydrique a une fois de plus conduit au développement d'un gradient de gonflement. Au moment de la rupture du corps d'épreuve, on mesure une expansion de l'ordre de 0,1 % à 0,08 m de profondeur et de l'ordre de 0,55 % aux profondeurs 0,27 m et 0,37 m.

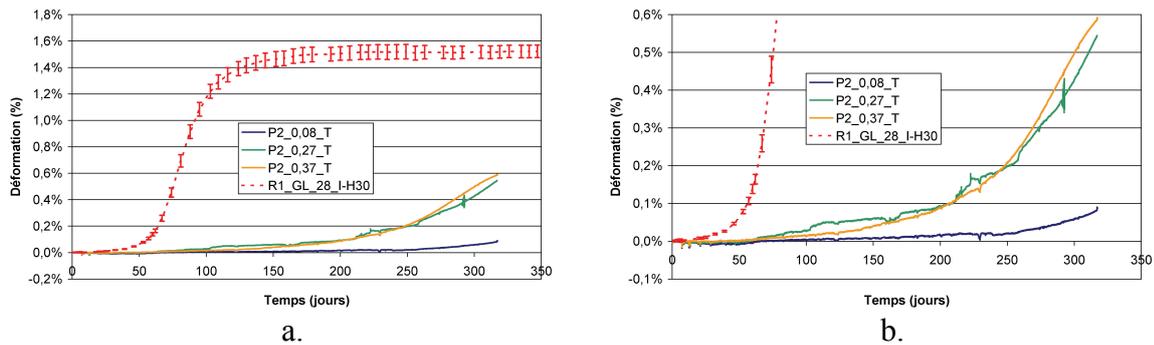


Figure 4-22 : suivi des déformations transversales locales de la poutre P2 et comparaison au suivi dimensionnel en gonflement libre (a. vue générale ; b. zoom)

2.1.2.2 Mesures en faces supérieure et inférieure (extensomètres à corde vibrante)

La Figure 4-23 représente les suivis dimensionnels transversaux en face inférieure de la poutre P2 réalisés à l'aide d'extensomètres à corde vibrante de base 250 mm (cf. Annexe 1) et les compare à la déformation locale mesurée à 0,37 m de profondeur par jauge noyée. Conformément à nos attentes, les expansions se développent de manière plus précoce en face inférieure, directement en contact avec l'eau. Néanmoins, on observe après environ 200 jours une stabilisation des gonflements mesurés qui n'est pas du tout retranscrite par la mesure interne à 0,37 m. Ce phénomène peut potentiellement trouver une explication dans la fissuration importante de la partie immergée de la poutre P2 (cf. Figure 4-24) : la fissuration en elle-même d'une part et la « désagrégation » du matériau sous les effets des expansions d'autre part ont pu entraîner un « glissement » des points d'ancrage des capteurs et conduire à ce type de résultats. Pour illustrer ce dernier point, on notera sur la Figure 4-24.a que les inserts de fixation d'une des cordes vibrantes de la face immergée ont été arrachés suite à un « simple » choc lors de la manutention du corps d'épreuve après rupture. Ceci amène donc à se poser la question de l'intégrité physique des points de fixation des capteurs à ce stade des essais et de son effet quant à une éventuelle dérive des mesures. Enfin, le développement préférentiel d'une fissuration transversale peut induire une anisotropie des gonflements sous les effets d'un gonflement préférentiel dans la direction perpendiculaire à la fissuration si on s'en tient à la théorie avancée par (Fu et al. 1994-b).

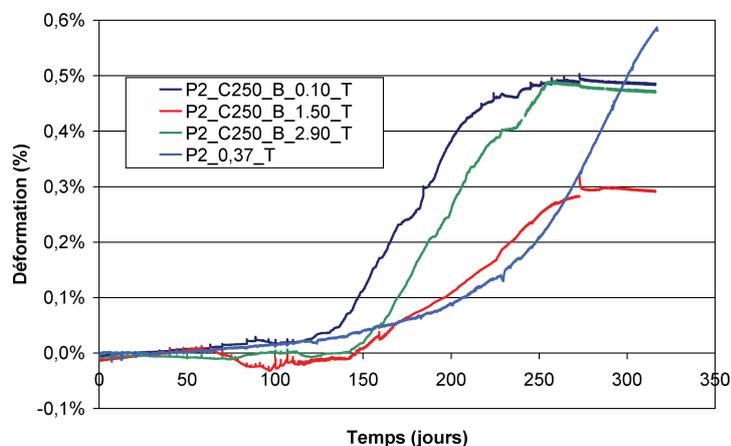
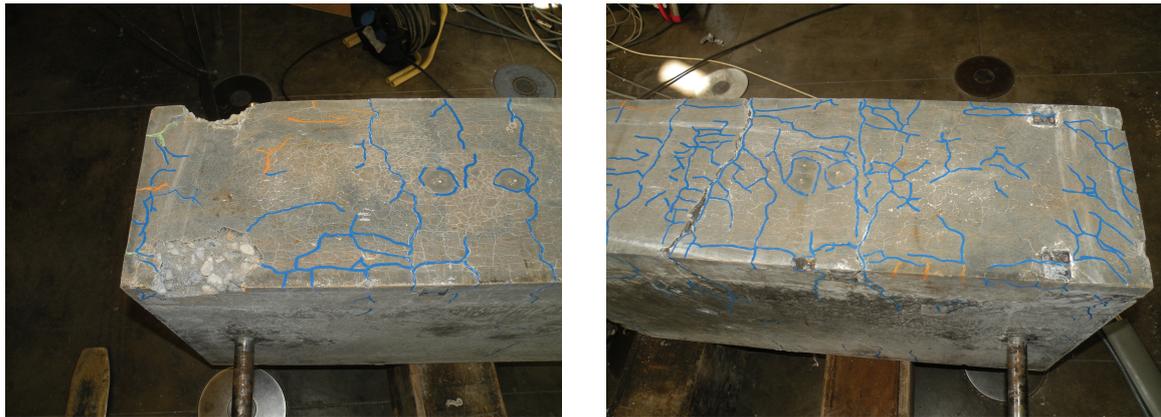


Figure 4-23 : évolution des déformations transversales en face inférieure et comparaison aux déformations internes à 0,37 de profondeur – poutre P2



a. b.
Figure 4-24 : fissuration en face inférieure de la poutre P2 (a. about Nord ; b. about Sud)

Par ailleurs, on note une différence notable de cinétique et d'amplitude de gonflement entre les cordes vibrantes situées sous les appuis à 0,10 m de chaque about (P2_C250_B_0,10_T et P2_C250_2,90_T) et celle positionnée à mi-portée (P2_C250_1,50_T) (cf. Figure 4-23). Ce phénomène peut s'expliquer par un report des gonflements empêchés par les cages d'armature mises en place autour des poignées d'appui des corps d'épreuve non armés afin de renforcer ces zones (cf. Figure 4-25). Ce point sera abordé plus en détail en section 3.

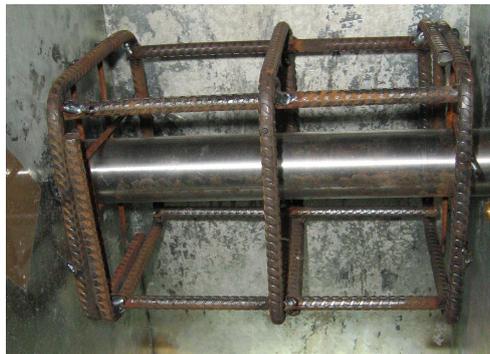


Figure 4-25 : cage d'armature pour renforcement des zones d'appui des poutres non armées mise en place dans le coffrage avant coulage

Finalement, la Figure 4-26 représente l'évolution des déformations transversales en face supérieure. On mesure dans ce cas un retrait lié au séchage de cette partie du corps d'épreuve à 30 % HR. Le retrait mesuré est légèrement moins important que celui observé à 0,08 m de profondeur. Une microfissuration en surface pourrait expliquer cette différence. Celle-ci aurait pu se développer durant la phase de fabrication des corps d'épreuve (possibilité de séchage modéré durant la phase de préparation des corps d'épreuve, talochage de la face supérieure lors de la fabrication...).

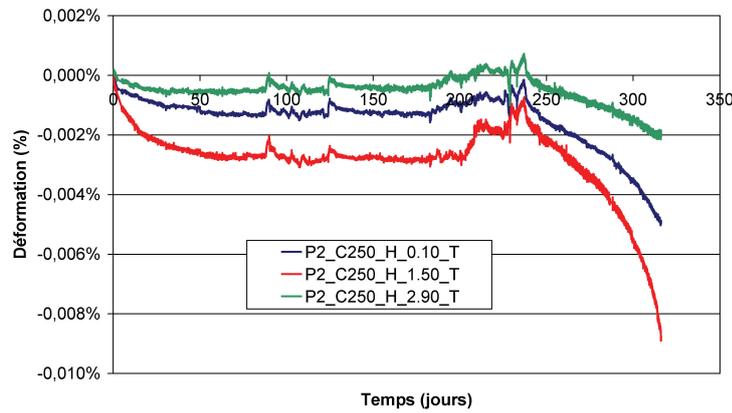


Figure 4-26 : évolution des déformations transversales en face supérieure – poutre P2

2.1.2.3 Mesures externes par cordes vibrantes

La Figure 4-27 confronte les suivis de déformation transversale à l'aide des extensomètres à corde vibrante. Une fois encore, on met en évidence des déformations plus marquées au voisinage de la zone imbibée ce qui est cohérent avec le gradient hydrique imposé au corps d'épreuve. Néanmoins, la réalisation de mesures au niveau de l'about Nord semble faire état d'un artéfact de mesure lié à la présence des cages d'armatures de renforcement d'appui : on mesure en effet des déformations plus importantes à l'aide des jauges situées dans une section courante de la poutre qu'avec les cordes vibrantes. Par ailleurs, les cordes vibrantes situées à 0,08 m ne font état d'aucun retrait, contrairement aux mesures obtenues à l'aide des jauges noyées ou des cordes vibrantes situées en face supérieure. Il est possible que la proximité des armatures de renfort des barres d'appui soit également à l'origine de cet écart.

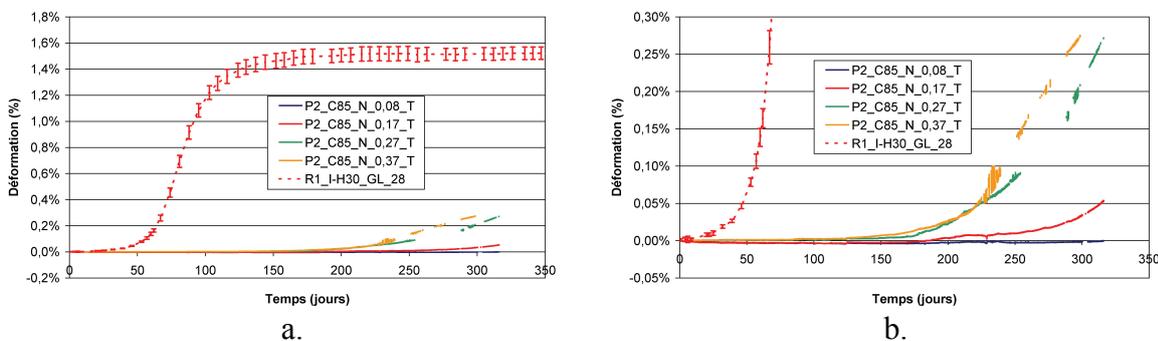


Figure 4-27 : suivi des déformations transversales locales de la poutre P2 par extensomètres à corde vibrante et comparaison au suivi dimensionnel en gonflement libre (a. vue générale ; b. zoom)

2.1.2.4 Confrontation des différentes mesures et profils de déformation transversales

La Figure 4-28 confronte les profils de déformation transversale mesurés (toutes techniques de mesure confondues) et les profils hydriques estimés (sur la base des modèles de comportement hydrique binaire d'une part et de gonflement libre pondéré d'autre part). Le profil obtenu à l'aide des mesures par jauges noyées met en évidence des expansions similaires aux profondeurs 0,27 m et 0,37 m durant les premiers mois de suivi. Le profil de déformation apparaît ainsi fortement non linéaire et est cohérent avec la forte fissuration

développée en partie basse (cf. section 2.1.5) Une telle observation aurait tendance à appuyer la théorie d'une progression brutale de la zone d'imbibition (à l'image du modèle de comportement hydrique binaire), permettant ainsi un développement de gonflements rapide dans la partie imbibée puis une chute importante et rapide des déformations à mesure qu'on s'éloigne du front en remontant dans la structure. Néanmoins, de telles observations ne suffisent pas à valider les hypothèses formulées dans le cadre de cette modélisation du comportement hydrique de la structure. En effet, le modèle de comportement hydrique de gonflement libre pondéré conduit à une remontée hydrique très rapide qui ne semble pas cohérente avec les faibles déformations mesurées à 0,08 m de profondeur.

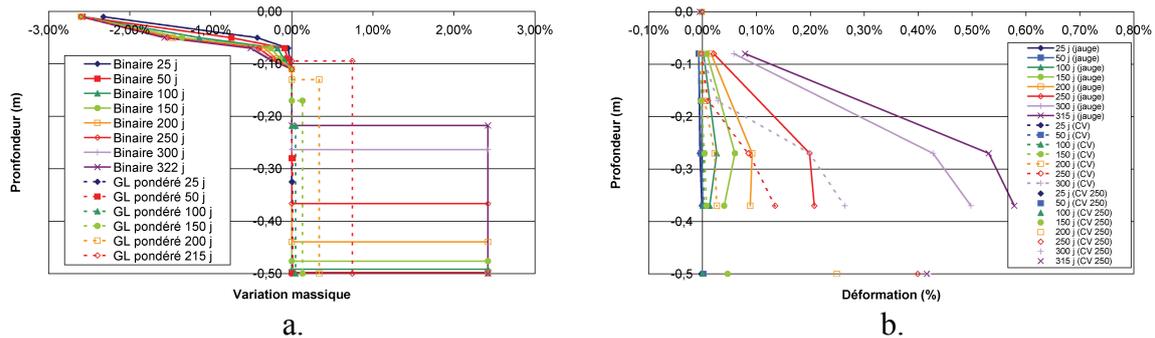


Figure 4-28 : évolution comparée des profils hydrique (a.) (modèles « binaire » et « gonflement libre modifié ») et de déformation transversale (b.) de la poutre P2

2.1.3 Fonctionnement de la poutre dans la direction longitudinale

2.1.3.1 Déformations longitudinales locales

La Figure 4-29 représente les suivis dimensionnels locaux par jauge noyée de la poutre P2 dans la direction horizontale. On note que les gonflements mesurés sont bien inférieurs au potentiel d'expansion du matériau en gonflement libre. Outre les phénomènes de couplage hydrique, ceci est explicable par le fonctionnement mécanique de la poutre, les expansions en partie basse étant empêchées par le retrait de la partie supérieure. Les déformations sont d'autant plus importantes à mesure qu'on s'approche de la zone imbibée, confirmant ainsi la création d'un gradient de gonflement par l'application du gradient hydrique. Un retrait de séchage maximum de l'ordre de 0,01 % après une cinquantaine de jours est mesuré à une profondeur de 0,08 m, à l'image des suivis dans les directions transversale et verticale. Ce retrait est d'autant plus faible que le point de mesure considéré est situé en profondeur.

La Figure 4-30 compare l'évolution du profil de déformation longitudinale de P2 aux profils hydriques évalués à l'aide des approches développées en sections 1.4.1.2.3 et 1.4.1.2.4. Une fois de plus, le modèle de comportement hydrique de gonflement libre pondéré par la cinétique de prise de masse globale de la poutre estime par exemple qu'à 150 jours, le front d'imbibition est à ce stade à une profondeur de l'ordre de 0,18 m. Or, l'expansion mesurée en ce point est faible (0,016 %) et ne semble pouvoir s'expliquer que par un effet de déformation empêchée inhérent au fonctionnement mécanique de la poutre. De plus, la variation de masse correspondante ne semble pas en adéquation avec les déformations significatives mesurées en partie basse de la structure. Le modèle de comportement hydrique binaire estime quant à lui une profondeur du front d'imbibition de

l'ordre de 0,22 m à 320 jours qualitativement cohérente avec les gonflements importants mesurés en partie basse.

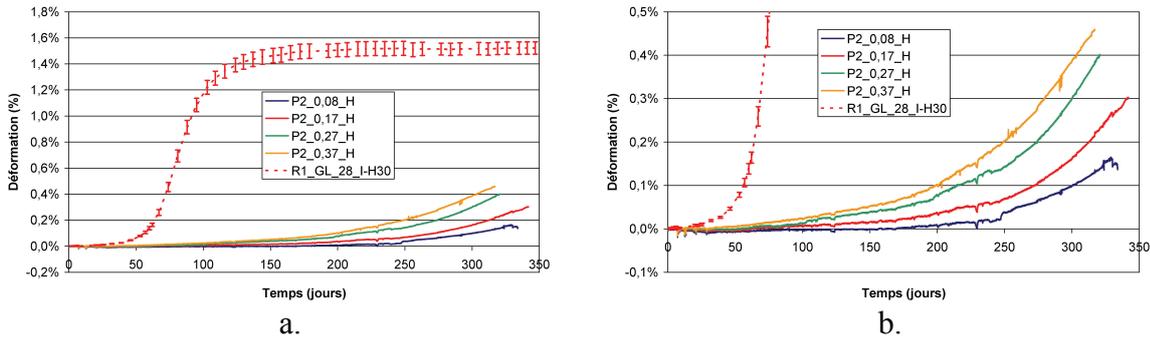


Figure 4-29 : suivi des déformations longitudinales locales de la poutre P2 et comparaison au suivi dimensionnel en gonflement libre (a. vue générale ; b. zoom)

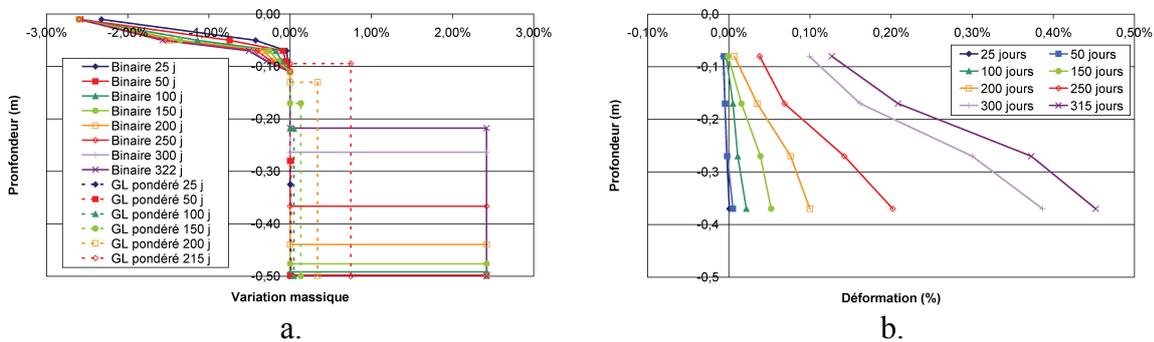


Figure 4-30 : évolution comparée des profils hydrique (a.) (modèles « binaire » et « gonflement libre modifié ») et de déformation longitudinale (b.) de la poutre P2

L'évolution du profil de déformation horizontale au cours du temps suggère l'existence d'une relation linéaire entre les expansions mesurées sur la hauteur de la poutre. La réalisation d'une régression linéaire sur ces données (cf. sections 2.1.3.3 et 2.1.3.4) permet alors d'obtenir la déformation longitudinale en fibre supérieure (cf. Figure 4-31). Ainsi, jusqu'à 250 jours, on estime qu'une contraction (issue du retrait d'une part et des gonflements imposés en partie basse d'autre part) est dominante dans cette partie du corps d'épreuve. Après cette échéance, il semble que des expansions se développent, aboutissant à une elongation sur toute la hauteur de la poutre (section entièrement « tendue »). La déformation de 0,03 % au moment de la rupture du corps d'épreuve semble cohérente avec l'absence de fissuration en face supérieure observée expérimentalement. Une elongation à cet endroit de la poutre est explicable par les déformations importantes imposées à une grande partie de la structure à cette échéance (la partie inférieure de la poutre soumise à un gonflement fort « entraîne » le reste de la structure).

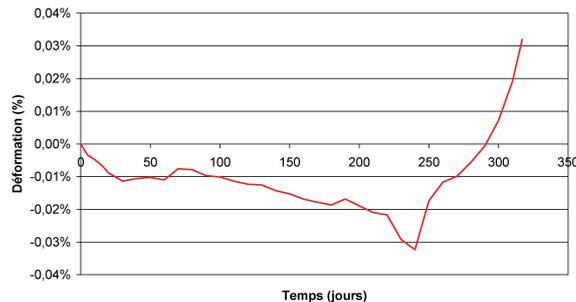


Figure 4-31 : estimation de la déformation longitudinale au niveau de la face supérieure de P2

La Figure 4-32 représente les suivis des déformations longitudinales locales à l'aide des extensomètres à corde vibrante et les compare au profils de déformation obtenus à l'aide des jauges noyées. On note un comportement général des différents signaux similaire à celui obtenu à l'aide des capteurs internes. De la même façon, la représentation des profils de déformation à différentes échéances met en évidence leur linéarité. On note toutefois que les courbures des profils sont assez nettement plus marquées. Une évaluation détaillée de leur pertinence est présentée en sections 2.1.3.3 et 2.1.3.4.

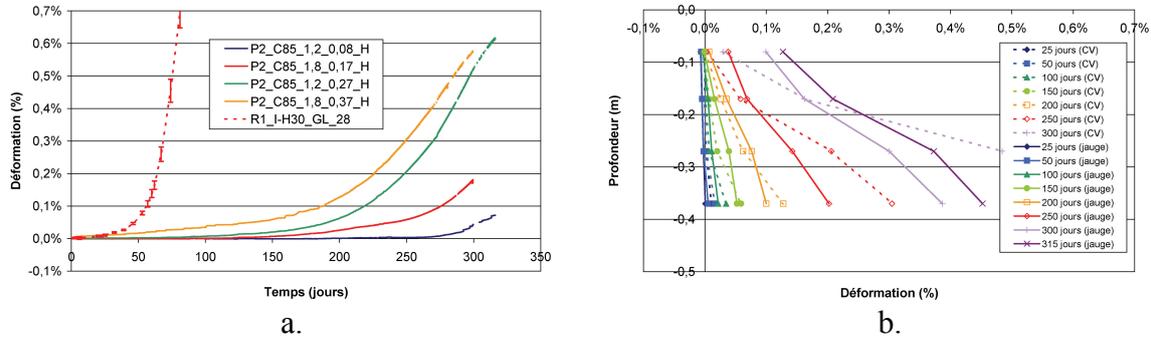


Figure 4-32 : suivi des déformations longitudinales locales de la poutre P2 à l'aide d'extensomètres à corde vibrante (a. suivi temporel ; b. profils de déformation)

2.1.3.2 Déformations longitudinales globales

Des mesures de déformation longitudinale globale ont été réalisées à l'aide de capteurs LVDT et d'extensomètres à corde vibrante de grande base (cf. Annexe 1). Pour ces données, il convient de mentionner le cas particulier des capteurs P2_E_0,47_H et P2_O_0,47_H : le point de fixation Nord de la base de mesure est situé à 0,47 m de profondeur. En revanche, le point de fixation Sud est situé une dizaine de centimètres plus haut afin de placer le capteur hors d'eau. Par conséquent, on mesure ainsi la déformation horizontale entre deux points situés à des profondeurs différentes. Dans ces travaux, on considère alors que la mesure obtenue est représentative des points situés à une profondeur égale à la moyenne des cotes des deux points de fixation du système d'instrumentation. Ceci se justifie par la quasi-linéarité du profil de déformation horizontale (cf. Figure 4-30).

La Figure 4-33 confronte les mesures réalisées à l'aide des LVDT et les déformations à des profondeurs équivalentes estimées à l'aide du profil de déformation déterminé à l'aide des jauges noyées. Ces résultats apparaissent cohérents et font état d'une bonne corrélation étant donné l'amplitude des phénomènes observés. Néanmoins, on note des écarts significatifs entre les déformations mesurées et les déformations estimées, en particulier en fin de suivi, lorsque les expansions et la fissuration sont très importantes. A ce stade, la rotation des sections et la fissuration des matériaux induisent nécessairement des erreurs de mesure. La Figure 4-34 illustre la rotation d'une section située à 0,4 m de l'about Nord de P2 après 329 jours d'exposition (i.e. très peu de temps avant la rupture). Sur cette figure, la partie métallique visible en haut est horizontale (règle support des capteurs de flèche). L'équerre métallique servant de point de mesure est perpendiculaire à l'axe de la section droite correspondante.

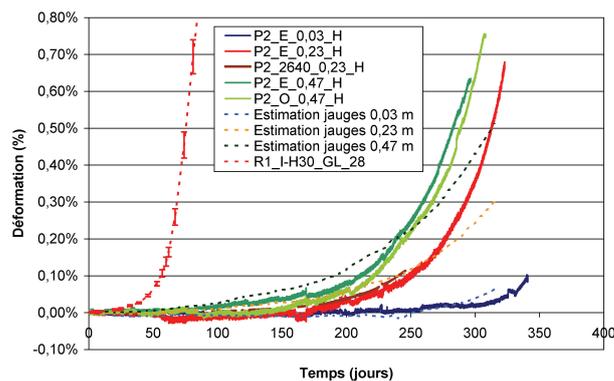


Figure 4-33 : suivi des déformations longitudinales globales de la poutre P2 et comparaison aux estimations issues des mesures par jauge noyée

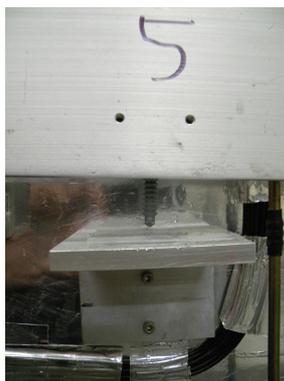


Figure 4-34 : rotation d'une section située à 0,4 m de l'about Nord de P2 après 329 jours de suivi

2.1.3.3 Mesure de flèches

La Figure 4-35 représente l'évolution des flèches de la poutre P2 au cours du temps. Durant environ 270 jours, l'évolution des flèches se fait de manière similaire pour la face Est (capteurs 1_S-E à 5_N-E) et la face Ouest (capteurs 1_S-O à 10_N-O) indiquant ainsi a priori un développement homogène des expansions à hauteur donnée (pas de torsion suivant l'axe longitudinal de la structure). Au delà de cette échéance, on note une différence d'évolution entre les capteurs des deux faces. L'évolution plus lente des flèches en face Est s'explique par la mise en contact des poignées d'appui des structures sous l'effet des gonflements (cf. Figure 4-36), empêchant ainsi la libre déformation de la structure et conduisant à l'application d'un effort dans l'axe de la poutre responsable des écarts de flèche entre les deux faces de la structure.

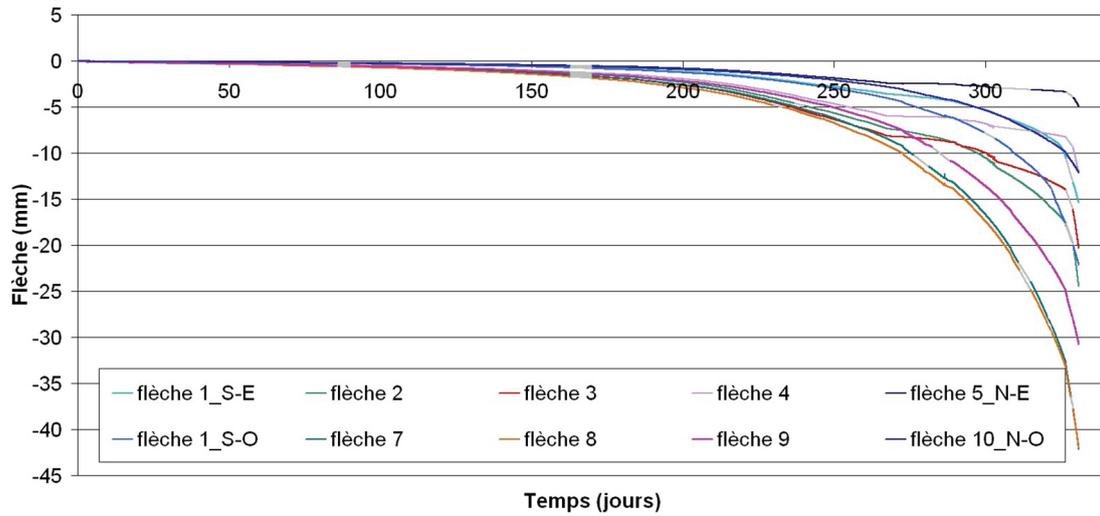


Figure 4-35 : suivi des flèches de la poutre P2

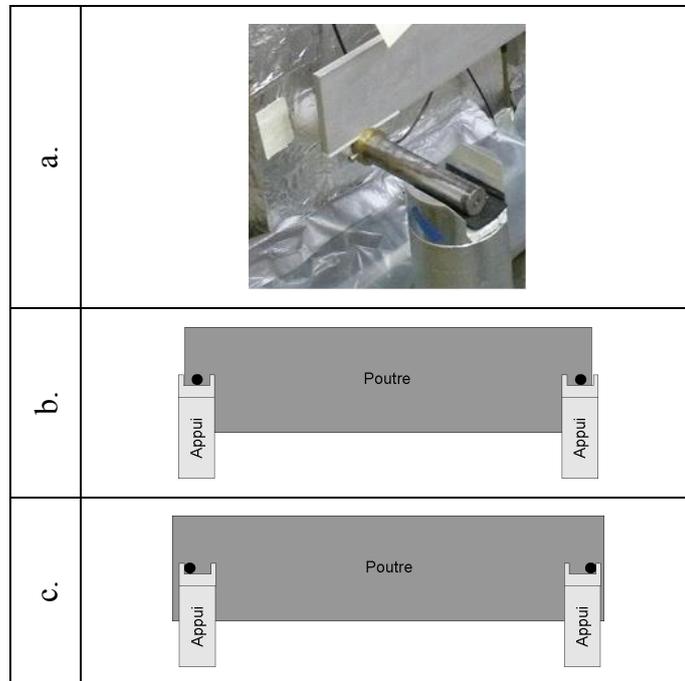


Figure 4-36 : évolution des conditions d'appui des poutres (a. vue générale d'un appui ; b. configuration normale ; c. appuis en contact sous l'effet des gonflements)

Devant la linéarité observée des déformations longitudinales, il convient de se poser la question de la validité de la théorie des poutres. Dans le cadre de cette théorie, l'équation de la déformée d'une poutre de courbure donnée s'écrit :

$$\begin{cases} f(x) = -\frac{\chi}{2} \cdot (x \cdot (x - l)) \\ \chi = \text{courbure de la section droite} \\ x = \text{abscisse de la section droite considérée} \\ l = \text{portée de la poutre} = 2,8 \text{ m} \end{cases} \quad (4-18)$$

La Figure 4-37 confronte les flèches à mi-portée mesurées et calculées en intégrant la courbure des sections évaluée à l'aide des mesures par jauges, par LVDT et par cordes vibrantes.

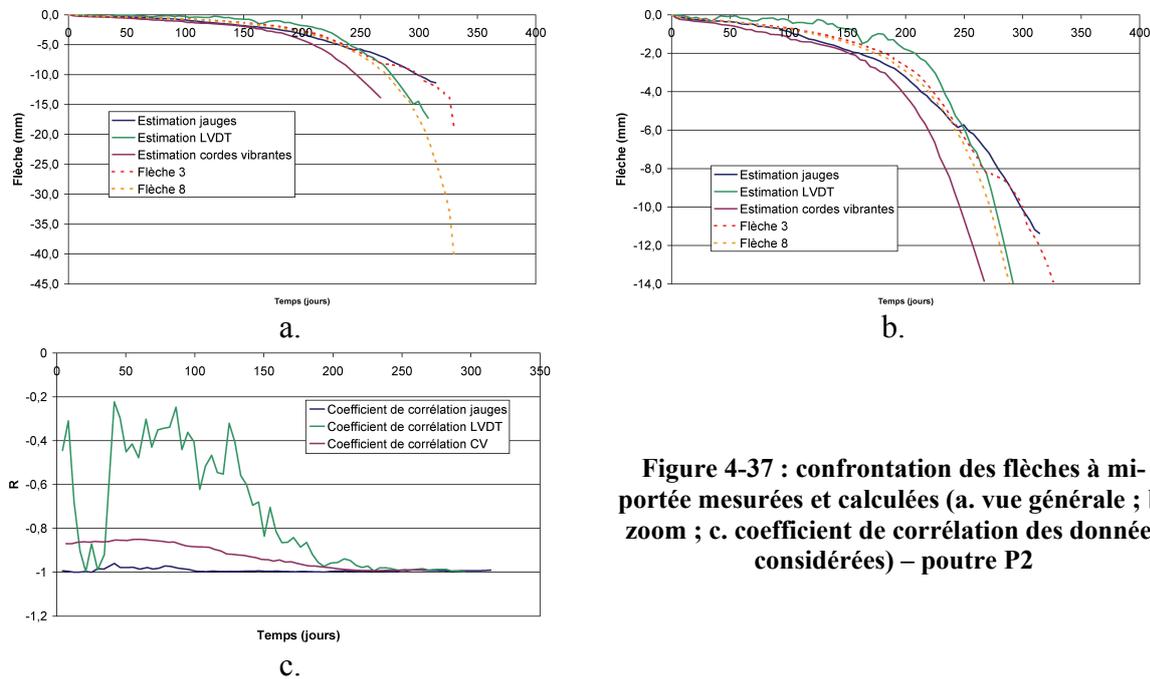


Figure 4-37 : confrontation des flèches à mi-portée mesurées et calculées (a. vue générale ; b. zoom ; c. coefficient de corrélation des données considérées) – poutre P2

Les mesures par jauges conduisent à une très bonne estimation de la flèche durant les 270 jours de déformation libre de la structure. Au delà de cette échéance, l'évolution distincte des flèches pour chaque face de la structure rend difficile l'évaluation de la pertinence de ce calcul. Le coefficient de corrélation des mesures par jauge noyée en fonction de la profondeur de mesure révèle une bonne linéarité du profil de déformations horizontales locales tout au long de la période de suivi.

Les mesures de déformation locale par extensomètre à corde vibrante révèlent une moins bonne linéarité que celle notée pour les jauges. Toutefois, l'intégration de la courbure correspondante permet d'obtenir une bonne estimation de la flèche durant environ 150 jours. Au delà, on note une dégradation de la prédiction qui reste néanmoins cohérente avec le fonctionnement de la poutre.

Par ailleurs, l'estimation des flèches sur la base des mesures de déformation globale à l'aide des capteurs LVDT conduit également à des résultats qualitativement cohérents avec les résultats expérimentaux. Néanmoins, on observe une corrélation médiocre entre les mesures de déformation et la profondeur correspondante durant environ 150 jours conduisant à obtenir une évaluation « bruitée » de la flèche comme l'atteste la Figure 4-37. Au delà de cette échéance, la corrélation est considérablement améliorée et conduit à une bonne estimation de la flèche.

Finalement, la bonne corrélation existant entre les flèches mesurées et calculées sur la base des mesures de déformations horizontales confirme la validité de la théorie des poutres. Cet élément se révèle être déterminant pour la suite de nos investigations et notamment pour l'analyse du fonctionnement mécanique des poutres proposée en section 2.6.

2.1.3.4 Profil de déformation horizontale moyen – description du fonctionnement structurel dans le cadre de la théorie des poutres

Afin de décrire quantitativement le fonctionnement mécanique de la poutre P2 soumise à un gradient hydrique, on propose un profil de déformation horizontal prenant en compte l'ensemble des mesures de déformations (locales et globales) dans la direction longitudinale (cf. Figure 4-38.a). Nous avons vérifié en section 2.1.3.3 la validité de la théorie des poutres pour le cas de la poutre P2. Ainsi, le fonctionnement mécanique de cette structure dans la direction longitudinale peut être décrit par la donnée de ce profil de déformation. La Figure 4-38.b compare l'estimation de flèche à partir de l'intégration de la courbure de ce profil à la mesure expérimentale. Conformément à nos conclusions de la section 2.1.3.3, on note une bonne corrélation entre les deux approches.

Ce profil peut être caractérisé par la donnée de la courbure (pente du profil en fonction de la hauteur) et la déformation longitudinale moyenne. Le Tableau 4-6 recense quelques valeurs caractéristiques de ce profil moyen et caractérise la dispersion des données expérimentales par rapport à celui-ci. On observe une augmentation de l'écart quadratique au cours du temps (de l'ordre de 0,07 % à 300 jours pour une expansion moyenne de l'ordre de 0,30 %).

Tableau 4-6 : évolution de la courbure et de la déformation longitudinale moyenne de la poutre P2

Échéance (j)	Courbure χ	Déformation longitudinale moyenne	Ecart quadratique
10	-1,68E-04	0,0003%	0,0021%
50	-2,42E-04	0,0011%	0,0047%
100	-5,43E-04	0,0069%	0,0095%
150	-1,19E-03	0,0212%	0,0139%
200	-2,70E-03	0,0543%	0,0180%
250	-7,10E-03	0,1414%	0,0338%
295	-1,47E-02	0,2991%	0,0714%

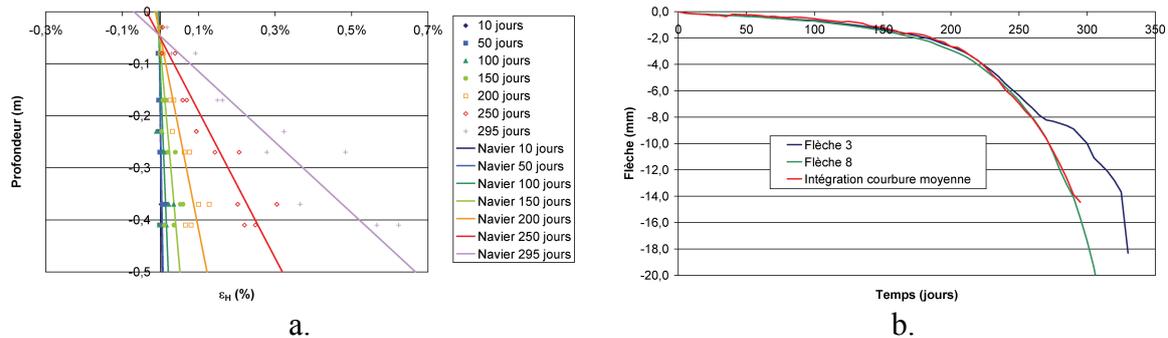


Figure 4-38 : profil de déformation longitudinale moyen (a.) et confrontation aux mesures de flèche (b.) – poutre P2

2.1.4 Evaluation de l'isotropie des déformations mesurées dans une poutre non armée

La Figure 4-39 représente le suivi dimensionnel local de P2 à une profondeur de 0,37 m. On observe que les déformations mesurées sont isotropes jusqu'à environ 250 jours et une elongation de l'ordre de 0,2 %. Au delà, cette isotropie n'est plus vérifiée et peut être interprétée comme le résultat d'une fissuration du matériau pouvant conduire au

développement de gonflements dans des directions préférentielles. Néanmoins, ce résultat ne permet pas de conclure quant à l'isotropie des gonflements d'origine chimique : en effets, hormis dans la direction verticale selon laquelle le gonflement est libre, les déformations sont le fruit de la superposition des déformations chimiques imposées que constituent les gonflements et de la réponse mécanique de la structure à cette sollicitation (calculable pour la direction longitudinale dans le cadre de la théorie des poutres applicables dans ce cas comme nous l'avons démontré en section 2.1.3.4.

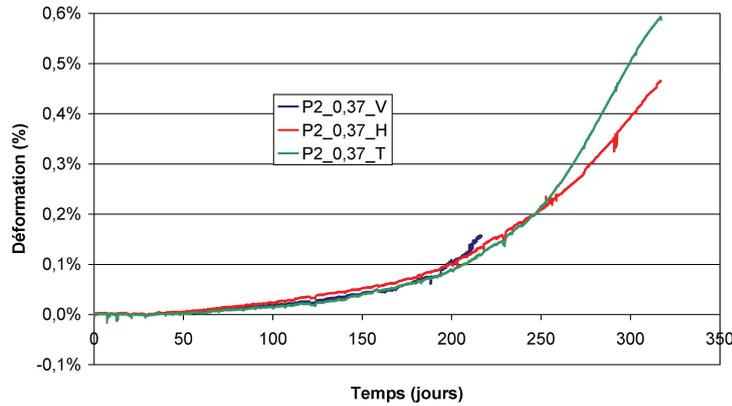


Figure 4-39 : déformations locales à une profondeur de 0,37 m – poutre P2

La Figure 4-40 retranscrit les déformations mesurées dans les trois directions de l'espace à une profondeur de 0,08 m pour la poutre P2. Les déformations peuvent être considérées comme isotropes durant environ 70 jours. Au delà, on observe des différences significatives. L'écart de déformation entre les directions horizontale et transversale peut s'expliquer par une éventuelle dispersion des phénomènes de RSI d'une part et par le mode de fonctionnement mécanique de la poutre soumise à une élévation en partie inférieure.

L'écart d'expansion dans la direction verticale par rapport aux deux autres directions peut s'expliquer en partie par le comportement intégrateur de la jauge dans cette direction. En effet, contrairement aux jauges horizontales et transversales situées dans un même plan horizontal (et donc a priori à la même humidité), la jauge verticale mesure les déformations d'un matériau situé entre 0,03 et 0,13 m de profondeur. Par conséquent, elle est soumise à un gradient de déformation. Le même phénomène se produit pour la jauge P2_0,37_V. Néanmoins, les amplitudes de déformations sont telles à cette profondeur que cet écart est masqué.

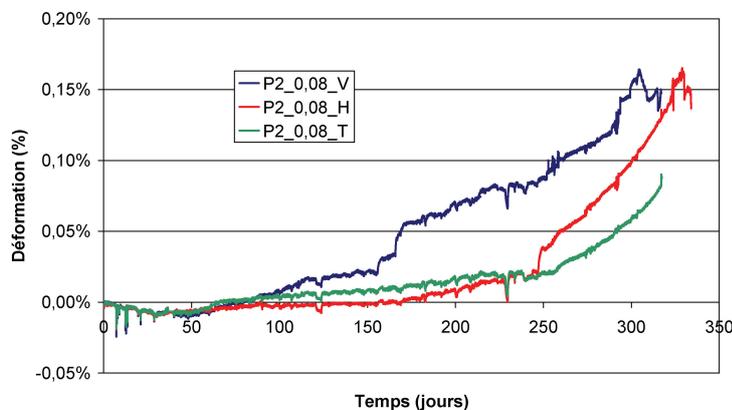


Figure 4-40 : déformations locales à une profondeur de 0,08 m – poutre P2

2.1.5 Description de l'évolution de l'état du corps d'épreuve : fissuration et déformation



Figure 4-41 : fissuration de la poutre P2
 a. faïençage en face inférieure (250 j) b. fissuration transversale (250 j) c. localisation (290 j)
 d. fissuration transversale préférentielle (face inférieure – post rupture) e. remontée de fissuration (post-rupture) f. déflexion de la structure (320 jours)

Les fortes déformations mesurées ont conduit à des dégradations très marquées des corps d'épreuve en termes de fissuration et de déflexion. La fissuration s'est d'abord développée en partie basse. Sous les effets des gonflements, on a assisté à la formation d'un faïençage en face inférieure (cf. Figure 4-41.a) après une durée d'exposition de 180-200 jours. Par la suite, une orientation préférentielle de la fissuration dans la direction transversale (cf. Figure 4-41.b) a été notée ce qui est cohérent avec la mise en flexion de la

poutre. La fissuration s'est ensuite fortement localisée au droit de ces ouvertures (cf. Figure 4-41.c et d). Les fissures sont alors progressivement remontées vers la face supérieure (cf. Figure 4-41.e) aboutissant à la ruine sous poids propre du corps d'épreuve après 330 jours d'exposition (cf. section 2.4). Cette fissuration s'est accompagnée d'une déflexion progressive de la structure (cf. Figure 4-41.f).

2.2 Suivis dimensionnels de la poutre faiblement réactive vis-à-vis de la RSI

2.2.1 Déformations dans la direction verticale

La poutre P1 est une poutre non armée dont le matériau constitutif est le béton NR (béton dont le squelette granulaire est identique à celui de R1 mais dont le ciment est moins enclin à la RSI du fait de ses plus faibles teneurs en sulfates, aluminates et alcalins). Ce corps d'épreuve a été moins instrumenté que les autres poutres pour des raisons techniques (nombre de voies disponibles sur les dispositifs d'acquisition). Ainsi, les données disponibles relatives à ce corps d'épreuve sont moins nombreuses.

La Figure 4-42 représente le seul point de mesure de déformation verticale disponible pour P1. Il s'agit d'une mesure réalisée à 0,08 m de profondeur. La jauge a fonctionné correctement jusqu'à une échéance d'environ 100 jours et a mesuré un retrait. Ce résultat est cohérent avec ceux issus des essais sur P2 et avec les mesures hydriques.

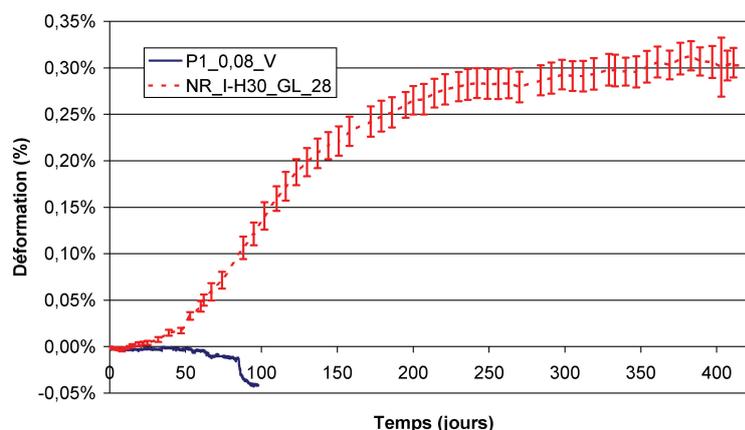


Figure 4-42 : suivi des déformations verticales locales – poutre P1

2.2.2 Déformations dans la direction transversale

La Figure 4-43 représente le suivi des déformations transversales locales de la poutre P1 aux profondeurs 0,08 m et 0,37 m. La voie de mesure P1_0,37_T présente deux variations brutales (il ne s'agit pas de sauts au sens strict du terme, ces variations n'étant pas instantanées) aux alentours de 140 jours et de 170 jours. Ces phénomènes traduisent probablement un dysfonctionnement de la jauge concernée, de telles variations ne semblant correspondre à aucun phénomène physique observé. Il est donc suggéré que l'information fournie par cette voie de mesure est erronée au delà de 130 jours de suivi.

Comme pour la poutre P2, on constate la création d'un gradient de déformation transversale par l'application du gradient hydrique, avec des elongations d'autant plus importantes qu'on s'approche de la zone impactée par la remontée hydrique.

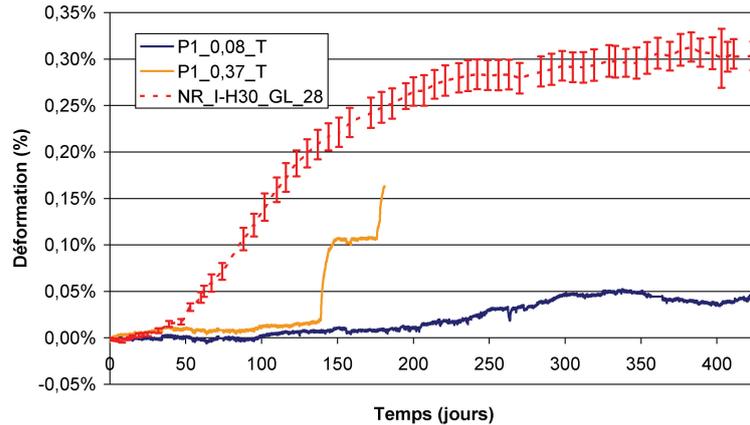


Figure 4-43 : suivi des déformations transversales locales – poutre P1

La déformation évaluée à 0,08 m de profondeur est de l'ordre de 0,05 % à l'issue des 427 jours d'exposition de la première phase des essais. Par ailleurs, la mesure de déformation transversale à 0,37 m de profondeur fait état d'une légère expansion avant son dysfonctionnement. Conformément à l'étude de la réactivité de cette formule menée au Chapitre 3, les déformations mesurées pour P1 (formule NR) sont considérablement moins importantes que celles observées pour P2 (formule R1).

2.2.3 Fonctionnement de la poutre dans la direction longitudinale

La Figure 4-44 représente le suivi des déformations longitudinales locales de la poutre P1. Un seul point de mesure est disponible à une profondeur de 0,08 m, soit dans la zone impactée par le séchage.

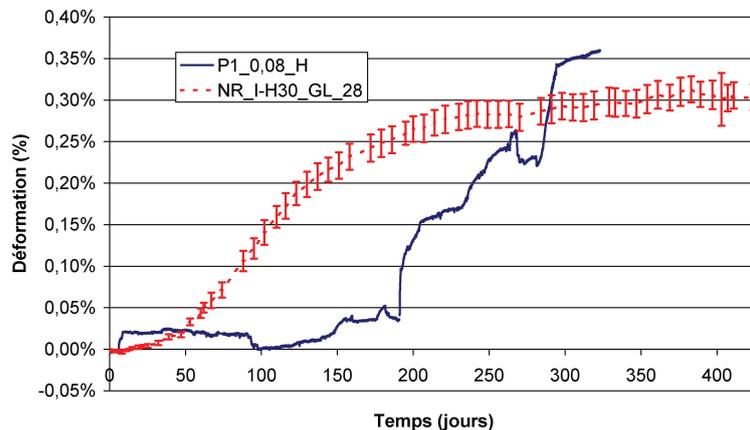


Figure 4-44 : suivi des déformations horizontales locales – poutre P1

La comparaison de la mesure obtenue aux expansions développées lors d'un essai de gonflement libre en eau semble indiquer que la déformation dans cette zone de mesure la plus éloignée du front d'imbibition développe des expansions supérieures au potentiel de gonflement libre après environ 300 jours. Par ailleurs, la cinétique de gonflement en ce point semble relativement rapide et perturbée par rapport à l'essai de gonflement libre. En outre, la déformation évaluée horizontalement se révèle être considérablement plus importante que la mesure transversale correspondante. Il en est de même si l'on compare cette valeur aux mesures de déformation longitudinale globale (cf. ci dessous). Ainsi, il

semble confirmé que cette valeur est erronée (ainsi que les mesures de P1_0,37_T au delà de 140 jours).

Les variations massiques de la poutre P1 étant très inférieures à celles de P2 (cette poutre est la seule faisant état d'un bilan massique négatif à l'issue des 427 jours de la première phase des essais), les différences d'évaluation de la position du front d'imbibition issues du modèle « binaire » ou « pondéré » sont moins importantes même si les écarts restent significatifs, en particulier lors des premiers instants de calcul (cf. Figure 4-45). Les deux modèles évaluent la profondeur d'imbibition à 0,37 m et 0,33 m pour le modèle de comportement hydrique binaire et le modèle de comportement hydrique de gonflement libre pondéré respectivement.

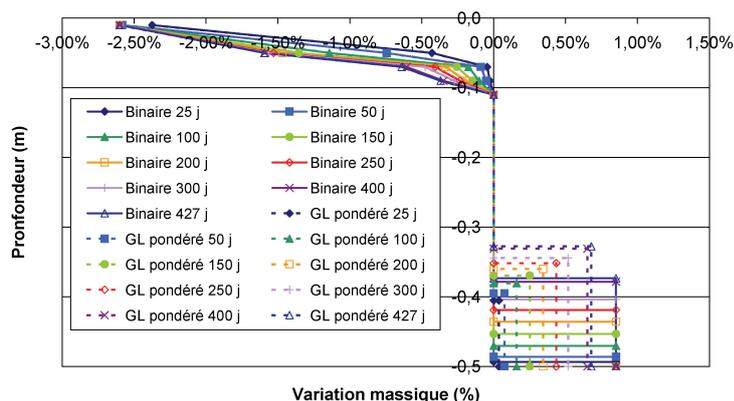


Figure 4-45 : évolution des profils hydrique (modèles « binaire » et « gonflement libre pondéré ») de la poutre P1

La Figure 4-46 représente le suivi des déformations horizontales globales de la poutre P1. On note sur cette figure qu'une interpolation des données a été nécessaire entre 230 jours et 360 jours pour les capteurs P1_E_0,47_H et P1_O_0,47_H. Durant cette période, un défaut du système de fixation des bases de mesure a conduit à une corrosion de celui-ci, engendrant une dérive des déformations mesurées. Le remplacement des pièces défectueuses a été réalisé à 360 jours, échéance à laquelle le recalage a été effectué. Ainsi, ces mesures en partie basse présentent une incertitude importante et il convient de les considérer avec précaution.

La poutre P1 fait état d'un comportement mécanique très différent de celui de P2 ce qui est compréhensible étant donné les différences de réactivité des matériaux et de profils hydriques. En particulier, on note une contraction relativement importante de la partie supérieure de la poutre : les gonflements développés en partie basse induisent en partie cet effet lors de la mise en flexion de la poutre, effet se combinant au retrait de séchage ayant lieu dans la zone supérieure. De telles contractions sont notées en début d'essai par (Multon 2004) pour des poutres réactives vis-à-vis de la RAG avec un potentiel d'expansion similaire au béton NR. Par ailleurs, à la fin de la première phase des essais, les gonflements en partie basse sont évalués à 0,15 %, ordre de grandeur cohérent avec le potentiel de gonflement libre de l'ordre de 0,3 % en eau pour le béton NR et la hauteur d'imbibition limitée pour ce corps d'épreuve.

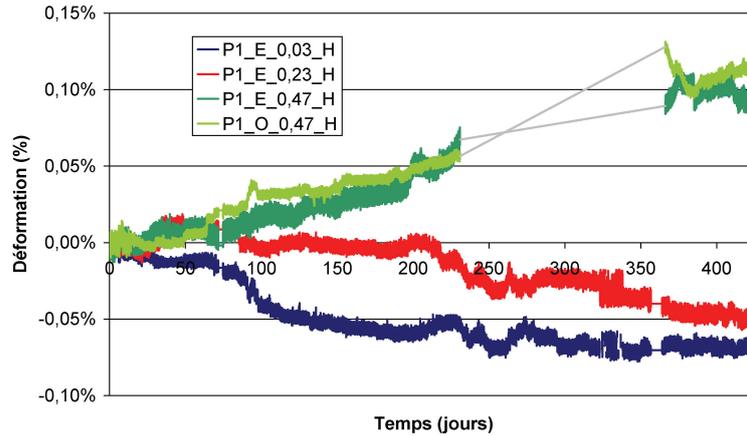


Figure 4-46 : suivi des déformations longitudinales globales de la poutre P1

2.2.4 Mesures de flèches

La Figure 4-47 représente le suivi des flèches de P1 au cours du temps. On note que la structure évolue « de manière symétrique » : les capteurs situés de part et d'autre de la poutre ou disposés symétriquement par rapport à la section médiane de la poutre montrent des évolutions très proches et attestent ainsi de l'homogénéité des phénomènes ayant lieu dans le corps d'épreuve.

Après 427 jours d'exposition, la flèche à mi-portée est de l'ordre de -1 mm, ordre de grandeur comparable au cas de la poutre non réactive de l'étude de (Multon 2004). En revanche, les flèches de poutres réactives vis-à-vis de la RAG sont de l'ordre de -5 mm après une durée d'exposition comparable et présentent des cinétiques sensiblement différentes. Ce résultat indique que, malgré des potentiels d'expansion en gonflement libre similaires, les comportements de poutres atteintes de RSI (formule NR) ou de RAG (Multon 2004) sont dans notre cas nettement différents. Il est en outre possible que l'application d'une cure thermique dans notre cas ait modifié les propriétés des matériaux (vis-à-vis de la dessiccation notamment) et accentué ces différences.

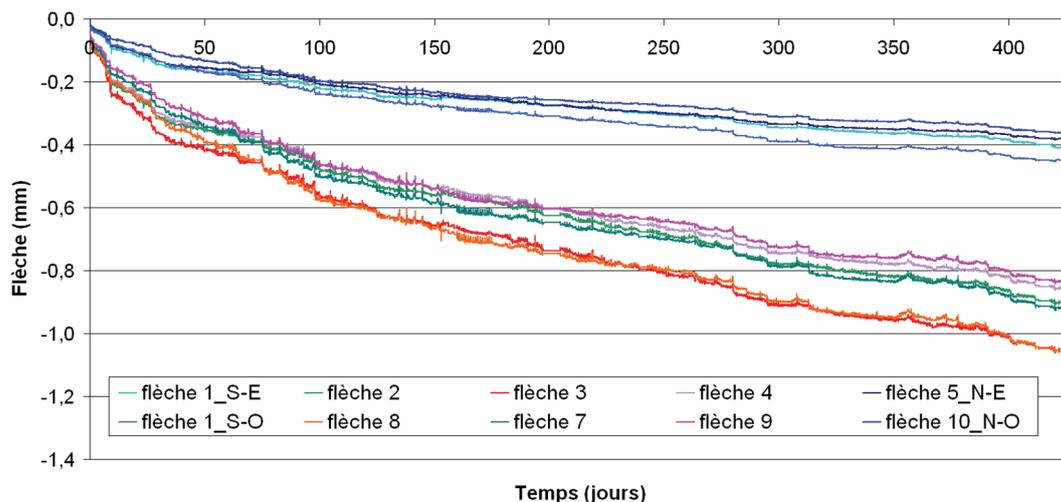


Figure 4-47 : suivi des flèches de la poutre P1

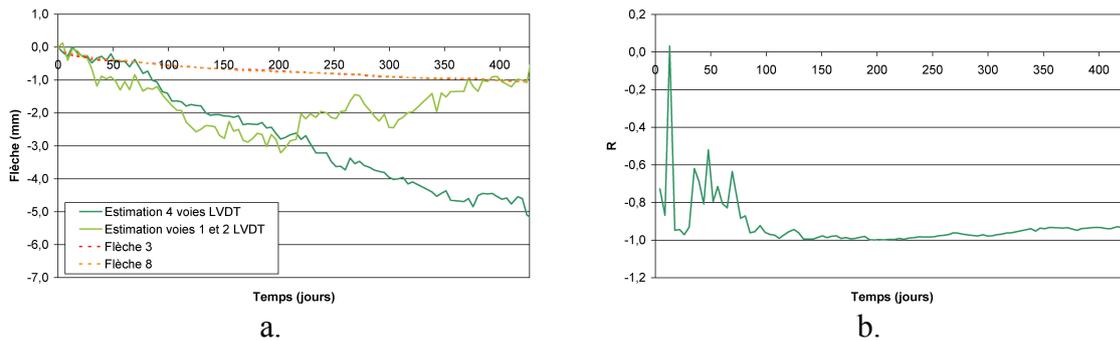


Figure 4-48 : confrontation des flèches à mi-portée mesurées et calculées (a.) et coefficient de corrélation (b.) – poutre P1

La Figure 4-48 compare les flèches mesurées à mi-portées à celles estimées par intégration de la courbure obtenue à l'aide des mesures de déformations horizontales globales par LVDT. Si l'ensemble des voies est considéré, l'estimation de la flèche se révèle être mauvaise bien que la valeur du coefficient de corrélation ne soit pas si dégradée qu'escompté étant donné le recalage nécessaire pour les mesures réalisées en partie basse. Néanmoins, devant les incertitudes de mesure correspondant aux capteurs P2_E_0,47_H et P2_O_0,47_H, nous avons réalisé le même calcul en utilisant uniquement les déformations à 0,03 m et à 0,23 m de profondeur. Si l'ordre de grandeur des estimations se trouve amélioré, la corrélation entre le calcul et l'expérience se révèle être médiocre.

2.2.5 Conclusions

Conformément à nos attentes, les déformations mesurées pour la poutre P1 se sont révélées bien moins conséquentes que celles de la poutre P2 en raison de la réactivité différente des matériaux. Aucune fissuration visible n'a été notée pour ce corps d'épreuve durant les 427 jours d'exposition.

L'analyse des différentes mesures réalisées a mis en évidence les difficultés de mise en œuvre de l'instrumentation pour cette poutre. En particulier, les mesures de déformations longitudinales se sont révélées peu pertinentes pour l'établissement d'un profil de déformation moyen. Ainsi, nous avons calculé la déformation horizontale moyenne de cette poutre à partir des mesures par LVDT aux profondeurs 0,03 m et 0,23 m. La courbure moyenne des sections a été calculée à partir des mesures de flèches à mi-portée à défaut d'un nombre suffisant de mesures de déformation longitudinale. Les résultats de ces calculs sont donnés par la Figure 4-49 et le Tableau 4-7.

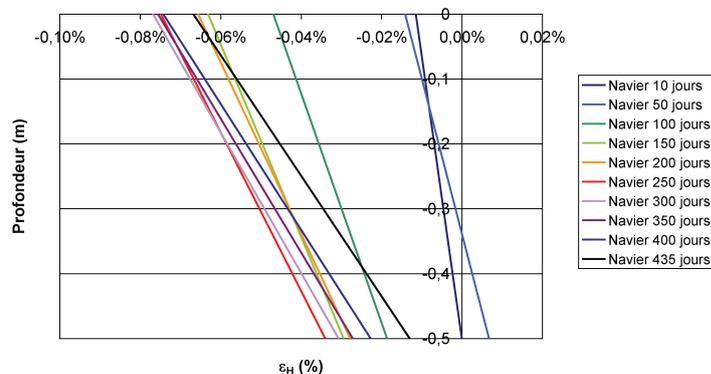


Figure 4-49 : profil de déformation longitudinale moyen – poutre P1

Tableau 4-7 : évolution de la courbure et de la déformation longitudinale moyenne de la poutre P1

Échéance (j)	Courbure χ	Déformation longitudinale moyenne
10	-2,29E-04	-0,0041%
50	-4,17E-04	0,0133%
100	-5,66E-04	0,0031%
150	-6,74E-04	0,0070%
200	-7,56E-04	0,0061%
250	-8,17E-04	-0,0233%
300	-9,23E-04	-0,0207%
350	-9,69E-04	-0,0372%
400	-1,03E-03	-0,0512%
435	-1,08E-03	-0,0582%

2.3 Suivis dimensionnels de la poutre réactive vis-à-vis de la RSI et de la RAG

2.3.1 Déformations dans la direction verticale

La Figure 4-50 représente les suivis dimensionnels verticaux locaux de la poutre P5 aux profondeurs 0,08 m et 0,37 m. La jauge P5_0,37_V a fonctionné durant environ 110 jours. La voie P5_0,08_V a quant à elle fourni une mesure satisfaisante durant 140 jours. Il est à noter que, comme P2, cette poutre a subi une ruine sous les effets combinés des gonflements et du poids propre après environ six mois d'exposition (cf. section 2.4).

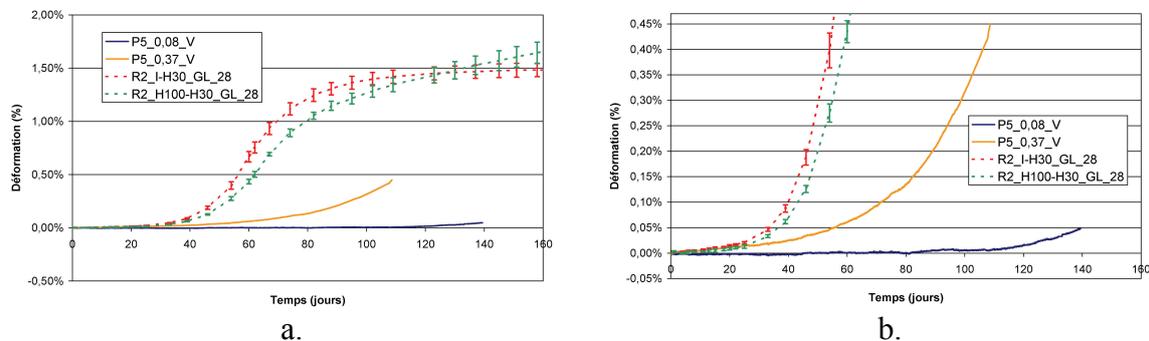


Figure 4-50 : suivi des déformations verticales locales de la poutre P5 et comparaison au suivi dimensionnel en gonflement libre (a. vue générale ; b. zoom)

On observe la création d'un fort gradient d'expansion par l'application du gradient hydrique : un gonflement de 0,05 % (soit environ 3 % du potentiel de gonflement libre) est mesuré après 140 jours à 0,08 m de profondeur. Cette valeur est atteinte après seulement 55 jours à 0,37 m. A cette profondeur, environ 30 % du potentiel de gonflement libre se sont développés après 110 jours d'exposition.

On note le développement très rapide des expansions dans ce corps d'épreuve : à 0,37 m de profondeur, la déformation verticale est de 0,1 % après 70 jours. Un niveau d'expansion équivalent n'est atteint qu'après environ 200 jours pour la poutre P2. De telles différences s'expliquent par les différences de réactivité des bétons R1 et R2 telles qu'elles ont été mises en évidence dans le Chapitre 3. A 0,08 m de profondeur, le retrait mesuré est très faible (voire quasi inexistant). On mesure une expansion de l'ordre de 0,05% après 140 jours d'exposition, déformation atteinte après 160 jours dans la poutre P2. Il semble donc que le gradient de déformation verticale de P5 soit plus accentué que celui de P2 (les

différences de cinétique entre la partie basse et la partie haute sont plus marquées dans le cas de P5).

La Figure 4-51 confronte l'évolution du profil de déformations verticales à celle du profil hydrique tel qu'il est estimé par les modèles développés en sections 1.4.1.2.3 et 1.4.1.2.4. Le modèle de comportement hydrique de gonflement libre pondéré n'a pas été considéré dans toute la suite : les variations massiques importantes et rapides du corps d'épreuve couplées à la sous estimation de la prise de masse du matériau imbibé conduisent à une progression extrêmement rapide de la position estimée du front d'imbibition aboutissant à une interpénétration des zones séchées et des zones imbibées, synonyme d'invalidité du modèle.

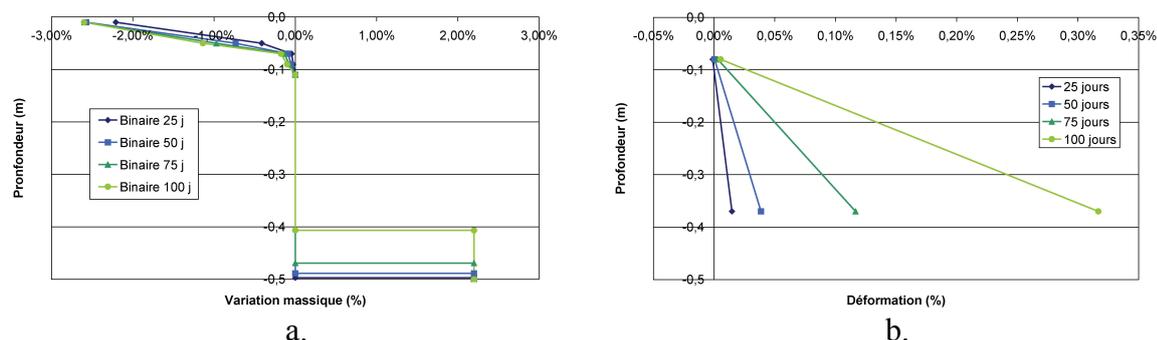


Figure 4-51 : évolution comparée des profils hydrique (a.) (modèles « binaire » et « gonflement libre modifié ») et de déformation verticale (b.) de la poutre P2

Le modèle de comportement hydrique binaire estime quant à lui la position finale du front d'imbibition au voisinage du point de mesure à 0,37 m. Ceci semble cohérent avec le profil de déformations verticales mesurées puisqu'on constate au dessus de ce point une décroissance très rapide des gonflements pour aboutir à une valeur proche de zéro à 0,08 m de profondeur. Ainsi, ce modèle semble plus cohérent pour expliquer le profil de déformations.

2.3.2 Déformations dans la direction transversale

La Figure 4-52 représente l'évolution des déformations transversales locales suivant la hauteur de la poutre. L'application d'un gradient hydrique conduit au développement d'un gradient de gonflement. Les déformations mesurées durant la période de fonctionnement des jauges noyées sont particulièrement conséquentes (entre 0,2 et 0,4 % au moment où le capteur atteint la limite de course) et apparaissent logiquement d'autant plus élevées que la profondeur considérée est importante (à échéance fixe).

La Figure 4-53 compare l'évolution du profil de déformation transversale et du profil hydrique modélisé. On note une évolution bien plus non linéaire de cette grandeur que dans le cas de la poutre P2, induisant certainement le développement de fortes autocontraintes à l'interface entre la zone imbibée et le reste de la poutre. Ceci semble une fois de plus appuyer l'hypothèse de progression très brutale du front d'imbibition avec une décroissance très rapide des gonflements mesurés au delà de la zone imbibée. A 125 jours le modèle de comportement hydrique binaire estime le front à environ 0,29 m de profondeur. Cette grandeur est à mettre en relation avec la déformation de 0,25 % mesurée à 0,27 m à la même échéance : si le seul profil hydrique ne permet pas de conclure quant à

l'expansion potentielle du matériau en ce point (en effet, contrairement à la direction verticale, on a dans le cas présent un effet de structure conduisant à une superposition de la déformation chimique imposée et de celle qui est inhérente au fonctionnement de la structure correspondant aux effets de déformation entraînée / empêchée par le reste de la poutre), il est néanmoins cohérent avec la forte non linéarité du profil de déformations transversales observée en partie basse de la structure. Une fois de plus, ce modèle de comportement hydrique semble donc cohérent avec le comportement mécanique de la poutre P5.

Des mesures transversales globales identiques à celles présentées pour P2 ont été réalisées. Néanmoins, les données correspondantes n'ont pu être intégrées à ce mémoire faute de temps. Leur intégration à notre raisonnement permettra d'affiner notre raisonnement et de comparer ces résultats à ceux obtenus pour la poutre P2.

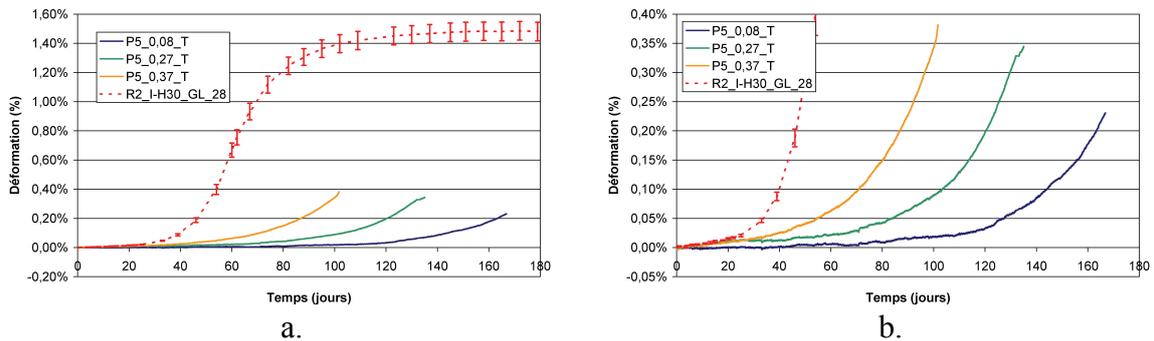


Figure 4-52 : suivi de déformations transversales locales de la poutre P5 et comparaison au suivi dimensionnel en gonflement libre (a. vue générale ; b. zoom)

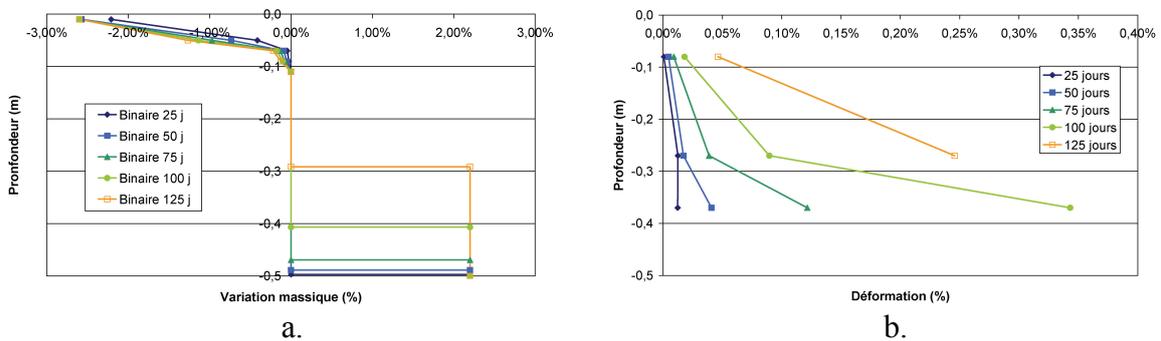


Figure 4-53 : évolution comparée des profils hydrique (a.) (modèles « binaire » et « gonflement libre modifié ») et de déformation transversale (b.) de la poutre P5

2.3.3 Fonctionnement de la poutre dans la direction longitudinale

2.3.3.1 Déformations longitudinales locales

La Figure 4-54 représente le suivi des déformations longitudinales locales de la poutre P5. La jauge mise en place à 0,27 m de profondeur s'est révélée hors d'usage avant le point zéro des mesures. Celle à 0,08 m de profondeur n'a fonctionné quant à elle qu'une dizaine de jours mais a pu mettre en évidence le développement de retrait sous les effets du séchage. Les mesures à 0,17 m et 0,37 m de profondeur semblent quant à elles indiquer le développement d'un gradient de gonflement.

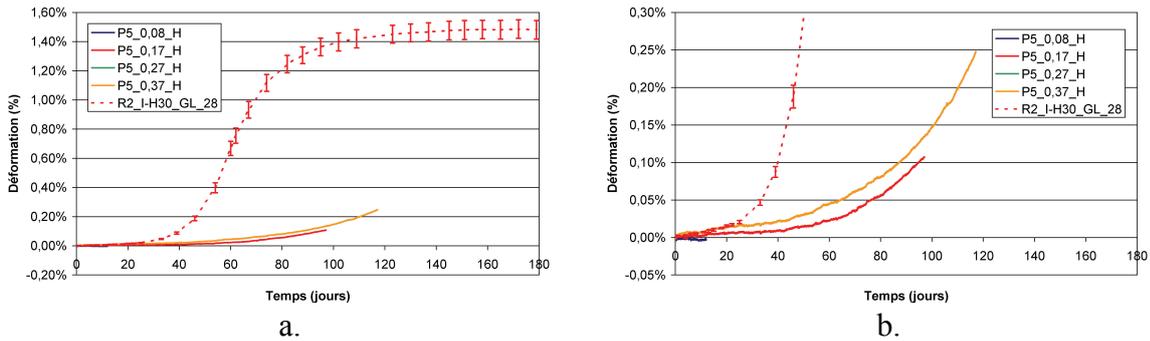


Figure 4-54 : suivi des déformations longitudinales locales de la poutre P5 et comparaison au suivi dimensionnel en gonflement libre (a. vue générale ; b. zoom)

La Figure 4-55 propose une comparaison du profil de déformations horizontales et du profil hydrique modélisé au cours du temps. En comparaison avec P2, la moins grande quantité de résultats expérimentaux concernant les mesures de déformation horizontale rend plus compliquée l'interprétation de ces données. Il apparaît ainsi délicat de conclure sur la sévérité du profil de déformation.

En supposant le profil de déformations horizontales linéaire (ce qui sera démontré en section 2.3.3.3), la fibre supérieure est estimée tendue dès 50 jours et on prédit l'apparition d'une fissuration en face supérieure dès 75 jours ce qui ne correspond pas à nos observations expérimentales (cf. section 2.3.5).

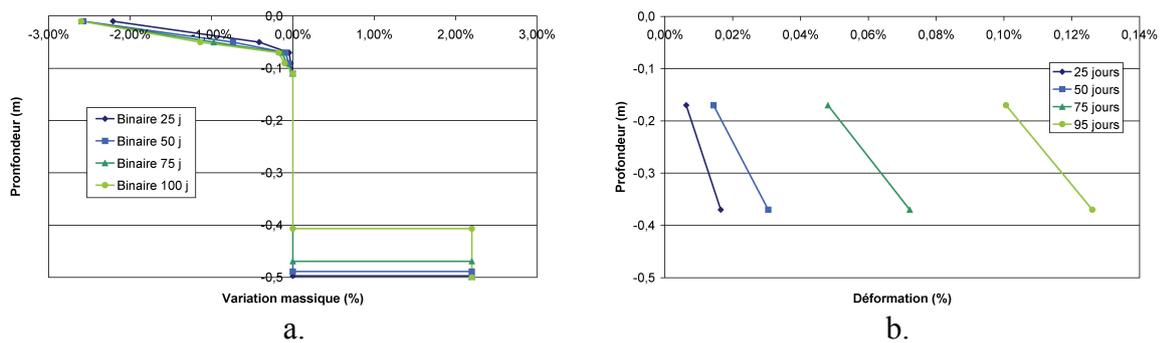


Figure 4-55 : évolution comparée des profils hydrique (a.) (modèles « binaire » et « gonflement libre modifié ») et de déformation longitudinale (b.) de la poutre P5

2.3.3.2 Déformations longitudinales globales

La Figure 4-56 représente les suivis des déformations longitudinales globales à l'aide des extensomètres LVDT. Les capteurs P5_E_0,03_H et P5_E_0,23_H n'ont permis un suivi de la structure que durant une centaine de jours. Au delà, les déformations importantes de la structure ont conduit à une déformation des bases de mesure rendant le suivi dimensionnel impossible.

On observe une contraction dans la partie supérieure de la poutre. Celle-ci n'est pas cohérente avec le profil de déformation obtenu à l'aide des jauges noyées présenté en section 2.3.3.1. Néanmoins, ce dernier n'a pu être établi que sur la base de deux points de mesure. Ainsi, le moindre biais dans une des deux mesures peut rapidement conduire à une erreur dans l'estimation du profil de déformation qu'il est difficile d'estimer.

On note un écart significatif entre les mesures à 0,47 m de profondeur sur la face Est et la face Ouest de la poutre. Ceci implique une torsion de la poutre suivant l'axe vertical. Visuellement, aucun effet de ce type n'a pu être observé sur la structure. Les

poignées d'appuis de la face Est ont été en contact avec les supports d'appuis sous les effets des expansions entre 100 et 120 jours de suivi (cf. section 2.1.3.3). Si ce phénomène a nécessairement eu un impact sur le développement des gonflements (les déformations en face Est ont été gênées par rapport aux déformations en face Ouest), il ne semble pas pouvoir à lui seul expliquer un tel écart entre ces deux voies de mesure. En l'absence d'investigations complémentaires, il semble délicat d'expliquer plus précisément ce point.

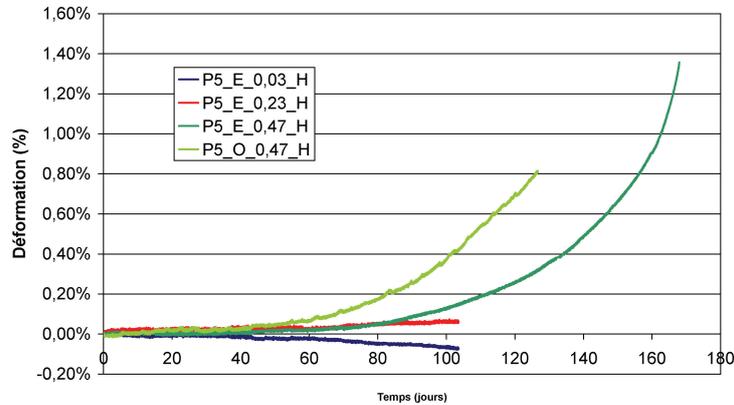


Figure 4-56 : suivi des déformations longitudinales globales de la poutre P5

2.3.3.3 Mesure de flèches

La Figure 4-57 représente le suivi des flèches de la poutre P5. Comme pour P1 et P2, on observe une évolution similaire des flèches en une section donnée de part et d'autre de la poutre jusqu'à une échéance d'environ 100 jours. De même, les points de mesure symétriques par rapport à la section transversale médiane de la poutre montrent une évolution comparable des déflexions de la structure. Entre 100 et 120 jours d'exposition, les poignées d'appui de la face Est ont été en contact avec les supports d'appui, de la même manière que pour P2 (cf. section 2.1.3.3). Ceci aboutit aux « plateaux » observés pour les capteurs Flèche 1_S-E à Flèche 5_N-E. Au delà de 120 jours, la poursuite des déformations de la structure a conduit à une disparition de ce contact, permettant à nouveau un déplacement libre de la structure.

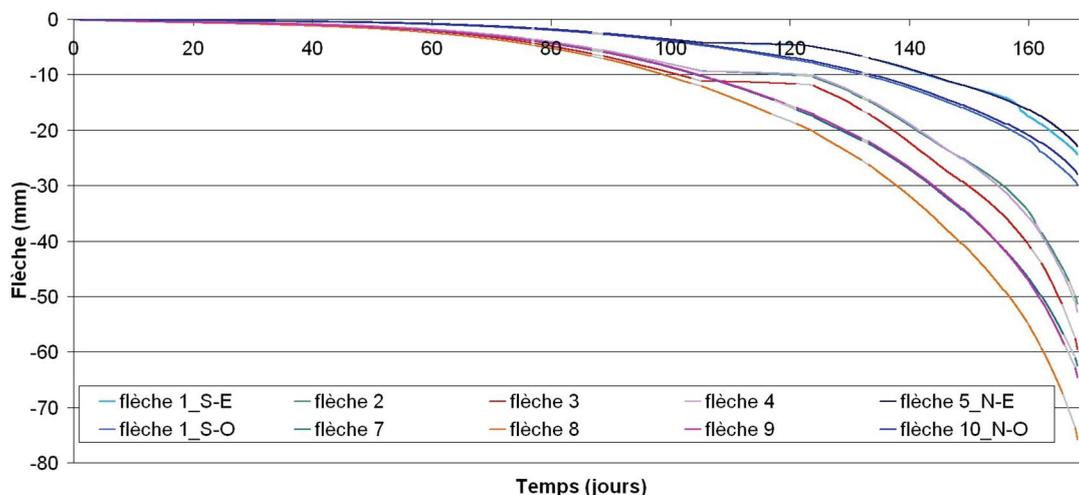


Figure 4-57 : suivi des flèches de la poutre P5

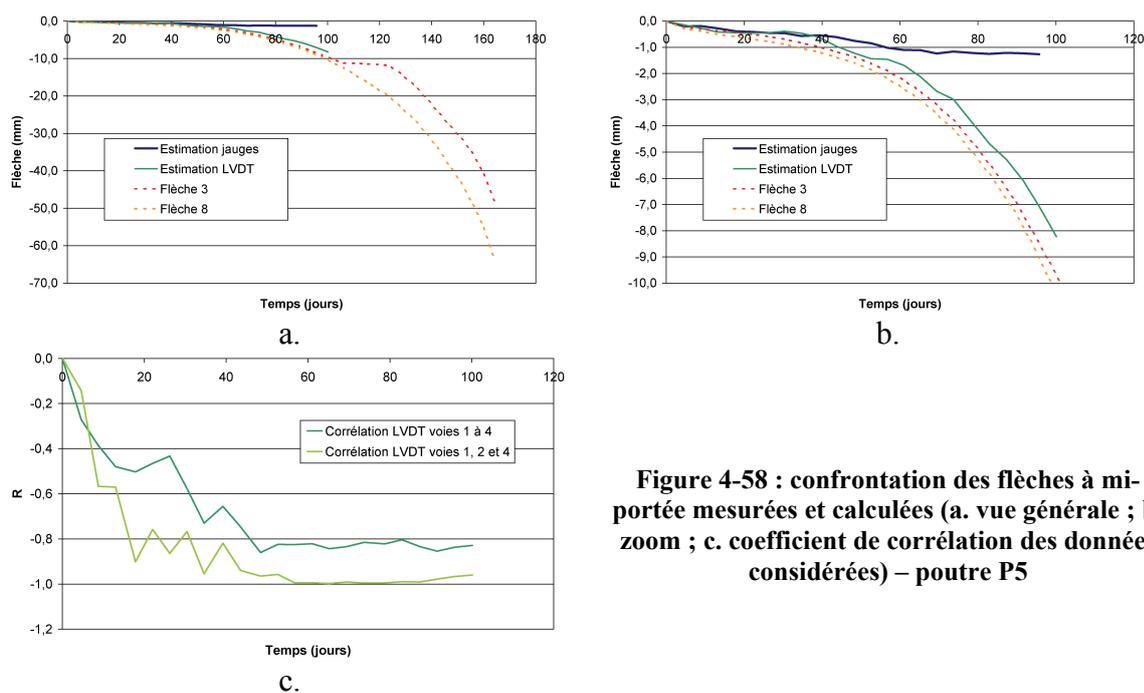


Figure 4-58 : confrontation des flèches à mi-portée mesurées et calculées (a. vue générale ; b. zoom ; c. coefficient de corrélation des données considérées) – poutre P5

La Figure 4-58 confronte les flèches mesurées à mi-portée à celles estimées en intégrant la courbure des sections obtenue par mesure des déformations longitudinales globales. On retrouve de manière satisfaisante la flèche de la structure, malgré un coefficient de corrélation avec la profondeur de mesure plutôt médiocre. Ce phénomène est attribuable au comportement singulier des mesures de déformation à 0,47 m de profondeur. Néanmoins, il semble que la mesure des déformations horizontales permette de décrire la flèche de la structure, vérifiant ainsi la validité de la théorie de la Résistance des Matériaux.

L'intégration de la courbure de la section à l'aide du profil de déformations longitudinales locales fournit une estimation satisfaisante de la flèche durant environ 40 jours. Au delà, la flèche est sous-estimée. Ne disposant que de deux points de mesure aux profondeurs 0,17 m et 0,37 m, l'établissement de la courbure de la section est excessivement dépendant de la précision des données collectées. Ainsi, un biais d'une des deux mesures utilisées peut rapidement conduire à une estimation erronée de la flèche. Par ailleurs, devant les déformations et la fissuration importantes de la structure (en particulier dans la partie inférieure soumise à l'humidification – cf. section 2.3.5), il est possible que l'adhérence entre la jauge pain de sucre et le béton environnant ait été dégradée. Ceci implique une sous estimation du gonflement en partie basse et par voie de conséquence de la flèche de la structure.

Toutefois, aucun élément ne permet d'éliminer de manière triviale une (toutes) mesure(s) obtenues à l'aide des jauges noyées. Par conséquent, l'intégralité des données est à considérer.

2.3.3.4 Profil de déformation horizontale moyen – description du fonctionnement structural dans le cadre de la théorie des poutres

Sur la base de cette analyse, le profil de déformation horizontale moyen représenté par la Figure 4-59.a est proposé. Celui-ci intègre la totalité des mesures de déformation

horizontale (mesures locales et globales). L'intégration de la courbure de ce profil permet d'estimer de manière satisfaisante la flèche de la structure (cf. Figure 4-59.b).

Ce profil peut être caractérisé par la donnée de la courbure et de la déformation longitudinale moyenne. Le Tableau 4-8 fournit quelques valeurs de ce profil moyen à différentes échéances et caractérise la dispersion des données expérimentales par rapport à celui-ci. Comme dans le cas de la poutre P2, on note une augmentation de l'écart quadratique au cours du temps. La valeur de l'écart à 100 jours est de l'ordre de 0,09 % (à mettre en relation avec la déformation moyen d'environ 0,11 %) et témoigne de l'écart mis en évidence entre les mesures locales et globales en section 2.3.3.3. On notera qu'à cette échéance, les premières fissures ont été détectées en partie basse (cf. section 2.3.4).

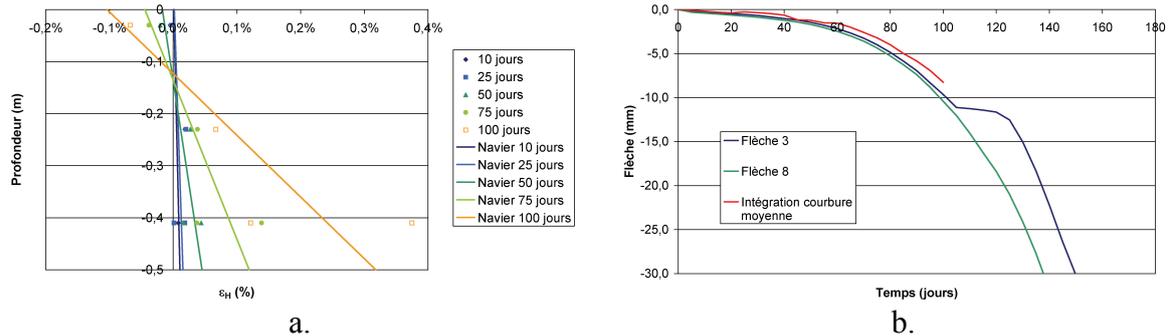


Figure 4-59 : profil de déformation longitudinale moyen (a.) et confrontation aux mesures de flèche (b.) – poutre P5

Tableau 4-8 : évolution de la courbure et de la déformation longitudinale moyenne de la poutre P5

Échéance (j)	Courbure χ	Déformation longitudinale moyenne	Ecart quadratique
10	-1,91E-04	0,0058%	0,0079%
25	-2,70E-04	0,0086%	0,0093%
50	-1,25E-03	0,0141%	0,0133%
75	-3,27E-03	0,0375%	0,0361%
100	-8,44E-03	0,1071%	0,0906%

2.3.4 Evaluation de l'isotropie des déformations mesurées

La Figure 4-60 compare l'évolution des déformations dans les trois directions de l'espace à une profondeur de 0,37 m. Les mesures indiquent des élongations similaires durant une quarantaine de jours. Au delà, les déformations dans les directions verticale et transversale évoluent plus rapidement que dans la direction horizontale. Ce résultat est cohérent avec le mode de fonctionnement mécanique de la poutre : les déformations longitudinales sont la superposition de la déformation chimique imposée par les expansions et des déformations empêchées par la partie supérieure de la poutre moins soumise aux gonflements car plus éloignée de la zone d'imbibition.

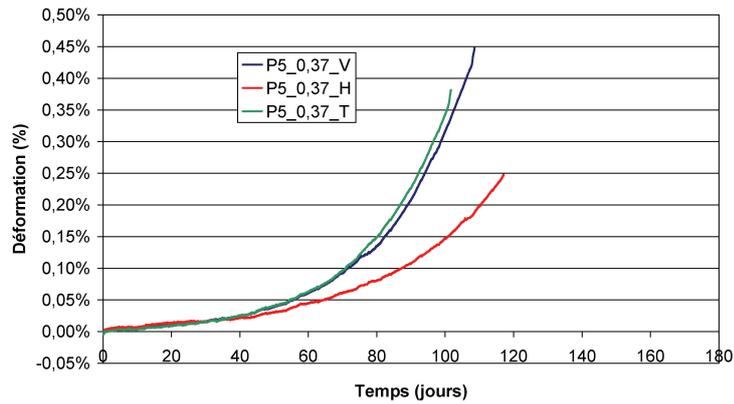


Figure 4-60 : comparaison des déformations locales dans les trois directions de l'espace à une profondeur de 0,37 m – poutre P5

2.3.5 Description de l'évolution de l'état du corps d'épreuve : fissuration et déformation



Figure 4-61 : fissuration de la poutre P5 (partie 1)
 a. fissuration transversale et faïençage (130 jours) b. apparition de la fissuration transversale (120 jours)
 c. fissuration transversale – vue de détail (145 jours) d. fissuration transversale – vue d'ensemble (145 jours)

De la même façon que pour P2, on note l'apparition de la fissuration au niveau de la partie immergée après environ 110 jours d'exposition (fissuration transversale et faïençage – cf. Figure 4-61.a et b). Par la suite, on observe une ouverture des fissures préférentiellement dans la direction transversale (cf. Figure 4-61.c, d et Figure 4-62.a), conformément au mode de fonctionnement mécanique du corps d'épreuve. On note la