

# Influence du milieu de conservation sur les variations dimensionnelles spontanées des sables-laitiers en cours d'hydratation

**Abdou BRAHMA**

Institut de Génie civil  
Université Saâd Dahleb  
Blida (Algérie)

## RÉSUMÉ

Un sable-laitier est constitué essentiellement d'un ou de plusieurs sables, d'un laitier vitrifié et d'activant et est principalement utilisé dans la confection des assises de chaussées. Les mélanges de sables-laitiers accusent dès leur confection des variations dimensionnelles dont une grande partie est liée à l'hydratation.

Dans cette étude, l'influence du mode de conservation et celle des paramètres liés à la teneur et à la nature de l'activant pour deux types de mélanges présentant des coefficients de forme et des dimensions maximaux très différents sont analysés.

Chaque variation dimensionnelle spontanée des matériaux hydrauliques en cours d'hydratation résulte de l'action de deux phénomènes antagonistes : un gonflement chimique et un retrait hydrique, liés à l'hydratation, auxquels s'ajoute un troisième phénomène de retrait dû à la dessiccation.

Les mélanges de sables-laitiers conservés à une humidité inférieure à la saturation présentent systématiquement, après quelques jours de conservation, un retrait qui dépend de la dimension des vides capillaires et de la déformabilité du matériau.

DOMAINE : Ouvrages d'art.

## ABSTRACT

### INFLUENCE OF THE PRESERVATION MEDIUM ON SPONTANEOUS DIMENSIONAL VARIATIONS IN SAND-SLAG MIXES DURING HYDRATION

*A sand-slag mix is basically composed of one or several sands, a vitrified slag and an activating agent; moreover, its primary application lies in producing road pavement foundations.*

*As of their composition, sand-slag mixes experience dimensional variations due, in large part, to the presence of hydration.*

*In this study, the influence of both the mode of preservation and parameters related to the content and type of activating agent is assessed for two categories of mixes exhibiting highly different form coefficients and maximum dimensions.*

*Each spontaneous dimensional variation in hydraulic materials during the course of hydration results from the action of two competing phenomena: chemical swelling and hydric shrinkage, both dependent upon hydration and to which a third phenomenon of drying shrinkage gets combined.*

*Sand-slag mixes held at humidity levels below saturation systematically display, after several days of preservation, shrinkage that depends on the size of capillary voids as well as on deformability of the material.*

*FIELD: Structural engineering.*

## Introduction

Pour des raisons économiques, on assiste de plus en plus au développement de l'utilisation des matériaux hydrauliques en technique routière. Ces matériaux se développeraient rapidement s'ils ne présentaient pas une fissuration préjudiciable à leur longévité. Celle-ci paraît inévitable dans un matériau hydraulique. Les variations dimensionnelles spontanées de ces matériaux en cours de durcissement constituent un élément essentiel de l'analyse du comportement des structures puisqu'elles peuvent engendrer des efforts dont la fissuration est l'une des manifestations.

Divers phénomènes agissent sur l'amplitude des déformations spontanées des matériaux traités aux liants hydrauliques, en cours d'hydratation.

Dans le cas des sables-laitiers, le liant a une prise et une cinétique d'hydratation lentes ; c'est pourquoi il est systématiquement recouvert d'un produit étanche juste après sa mise en place. Néanmoins, un échange limité d'eau avec le milieu extérieur est toujours envisageable.

Par ailleurs, il est bien connu que le séchage, s'il n'est pas empêché, peut donner lieu à un important départ d'eau, lequel influence fortement la prise et le durcissement du liant et les variations dimensionnelles ultérieures spontanées du matériau.

Dans cette étude sont d'abord présentés les matériaux utilisés, la formulation et la confection des éprouvettes. Les variations dimensionnelles spontanées mesurées en absence et en présence d'échanges d'eau avec le milieu extérieur sont ensuite commentées.

## Matériaux, formulation et confection des éprouvettes

### Matériaux utilisés

#### Sables

Deux catégories de sables ont été utilisées :

- le sable de base qui est le constituant principal du produit fini ;
- le sable correcteur destiné à modifier la granulométrie du mélange afin de lui conférer des caractéristiques de stabilité satisfaisantes.

Deux types de sables de base ont été utilisés :

- un sable fin naturel 0/1 mm de Labenne (coefficient de forme égal à 10) ;
- un sable concassé 0/6 mm de Igé (coefficient de forme égal à 62).

Les sables-laitiers élaborés avec les deux sables de base seront respectivement repérés (L) et (I).

Le sable correcteur choisi est un sable calcaire 0/8 mm provenant des établissements Piketty.

#### Laitier

Il s'agit d'un laitier granulé de réactivité  $\alpha = 20/40$  provenant de l'usine sidérurgique de Joeuf. Le coefficient  $\alpha$  est défini comme le produit de la surface spécifique S des fines naturellement présentes dans le laitier par le pourcentage de fines F produites par un broyage normalisé [1].

$$\alpha = \frac{SF}{100}$$

Les courbes granulaires des trois sables et du laitier sont représentées sur la figure 1. Leurs caractéristiques physiques sont indiquées dans le tableau I. Dans le tableau II sont donnés les résultats de l'analyse chimique du laitier.

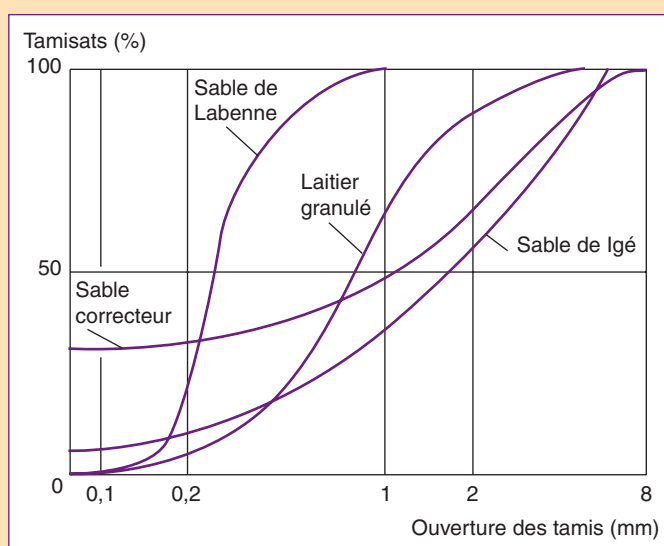
**TABLEAU I**  
Caractéristiques physiques des matériaux utilisés

| Dénomination     | Masse volumique des grains<br>(T/m <sup>3</sup> ) | Porosité (%) |
|------------------|---|--------------|
| Laitier granulé  | 2,53  | 12,8         |
| Sable de Labenne | 2,63  | 0,4          |
| Sable de Igé     | 2,62  | 0,4          |
| Sable correcteur | 2,66  | 0,7          |
| Chaux            | 2,41  |              |
| Gypsonat B       | 2,53  |              |
| Gypsonat A       | 2,56  |              |

**TABLEAU II**  
**Composition chimique du laitier**

| Oxyde                          | Teneur(%) |
|--------------------------------|-----------|
| CaO                            | 41,1      |
| SiO <sub>2</sub>               | 34,7      |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 15,3      |
| MgO                            | 4,8       |
| SO <sub>3</sub>                | 1,7       |
| K <sub>2</sub> O               | 0,7       |
| TiO <sub>2</sub>               | 0,6       |
| MnO                            | 0,4       |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,2       |

**Fig. 1 - Courbes granulaires des trois sables et du laitier.**



### Activants

Les activants utilisés sont de trois types :

- une chaux fine (< 80 µm) provenant de Champagne ;
- un gypsonat de type A (7 % d'alcalinité) ;
- un gypsonat de type B (13 % d'alcalinité).

Le gypsonat de type B est, de par son alcalinité plus élevée, un activant plus efficace que le gypsonat de type A.

### Formulation des mélanges de sables-laitiers

Le choix des compositions des mélanges de sables-laitiers s'appuie essentiellement sur les deux critères suivants [1, 2] :

- la stabilité immédiate qui traduit globalement l'aptitude au compactage et à la circulation des engins de chantiers ;
- les performances mécaniques qui caractérisent l'aptitude du matériau à résister à long terme aux différents modes de sollicitations dues au trafic.

À cet égard, le choix des formules a été effectué en suivant la procédure suivante [1] :

1. détermination d'une « formule centrale provisoire » à partir d'indices technico-économiques ;

2. recherche de la stabilité immédiate optimale qui est effectuée en déterminant la courbe intrinsèque du matériau à partir de quatre cercles de Mohr dont les étreintes latérales prennent les valeurs suivantes : 0,05 ; 0,1 ; 0,2 et 0,4 MPa ; la contrainte verticale appliquée est de 1 MPa. Le paramètre variable des éprouvettes est le dosage en sable correcteur autour de la valeur correspondant à la formule centrale provisoire.

La stabilité immédiate est généralement caractérisée par un coefficient de stabilité  $S_t$ , défini comme le rapport existant entre la portance  $P$  du sable-laitier avant prise et la charge verticale (1 MPa dans ces essais) qui lui est appliquée [1]. Le coefficient de stabilité  $S_t$  a été calculé à partir des éléments tirés de la courbe intrinsèque. Son étude a permis d'aboutir aux deux formules optimales suivantes :

|                            |                             |
|----------------------------|-----------------------------|
| <b>Sables-laitiers (L)</b> | 57 % de sable de Labenne    |
|                            | 30,2 % de sable correcteur  |
|                            | 12 % de laitier granulé     |
|                            | 0,8 % de gypsonat de type B |
| <b>Sables-laitiers (I)</b> | 81 % de sable de Igé        |
|                            | 10,2 % de sable correcteur  |
|                            | 8 % de laitier granulé      |
|                            | 0,8 % de gypsonat de type A |

On peut remarquer que le dosage en laitier est plus élevé dans le sable-laitier (L) que dans le sable-laitier (I). De plus, son activation est réalisée au moyen du gypsonat de type B. En général, les éprouvettes confectionnées avec le sable (L) ont une stabilité immédiate plus faible que celles confectionnées avec le sable (I) (10 pour les premières contre 23 pour les secondes) et probablement une plus faible résistance à long terme. Un plus fort dosage en laitier activé par un gypsonat plus efficace a été réalisé en vue de remédier à ces insuffisances.

Dans la suite, les caractéristiques de compactage des deux sables-laitiers sont celles de l'essai Proctor modifié :

Sable-laitier (L) :  $\gamma_{d_{OPM}} = 2,00 \text{ T/m}^3$  ;  $W_{OPM} = 8,5 \%$  ;

Sable-laitier (I) :  $\gamma_{d_{OPM}} = 2,21 \text{ T/m}^3$  ;  $W_{OPM} = 6,5 \%$ .

À titre indicatif, les angles de frottement interne mesurés, lors des essais triaxiaux précédents, sur les deux mélanges granulaires, sont :

$\varphi' = 43^\circ 4'$  pour le sable-laitier (L) ;

$\varphi' = 49^\circ 49'$  pour le sable-laitier (I).

Ce dernier mélange présente donc une plus grande stabilité immédiate, une densité sèche plus élevée et une cohésion plus grande.

Dans certaines éprouvettes destinées aux mesures de variations dimensionnelles, nous avons substitué aux activateurs un filler calcaire de même granularité afin de mettre en valeur l'influence des produits d'hydratation.

## Confection des éprouvettes

Les variations dimensionnelles des sables-laitiers ont été mesurées sur des éprouvettes cylindriques ( $\varnothing = 10 \text{ cm}$ ,  $H = 20 \text{ cm}$ ), sur l'axe dans le sens longitudinal. Les matériaux ont été malaxés à sec dans un malaxeur de laboratoire puis en présence d'eau.

Le mélange a été introduit dans le moule cylindrique en cinq couches successives, chacune d'elles étant piquée à l'aide d'une tige métallique de façon à assurer un précompactage et une bonne répartition du matériau dans le moule, ce qui permet de réduire les gradients de densité lors du compactage. Une pastille en PVC ( $\varnothing = 20 \text{ mm}$ ,  $H = 2 \text{ mm}$ ) est placée au centre de la face supérieure des éprouvettes, afin de servir d'appui pour la tige des capteurs de déplacement utilisés pour la mesure

des variations dimensionnelles. Le compactage a été réalisé par double pistonnage sous une charge croissante selon le diagramme de la figure 2.

Les pressions de moulage ont été respectivement de 40 et 50 MPa pour les deux sables-laitiers (L) et (I). Après la suppression de la charge et le démoulage, on a constaté un gonflement rapide des éprouvettes, de l'ordre de 1 à 2 %, dans le sens de la longueur et de 0,2 à 0,5 % dans le sens du diamètre. La quantité de matériau à introduire dans le moule doit être ajustée en fonction de ce gonflement. Après démoulage, on a mesuré systématiquement les dimensions des éprouvettes et leurs poids afin de s'assurer que les caractéristiques obtenues correspondaient bien à celles qui étaient recherchées.

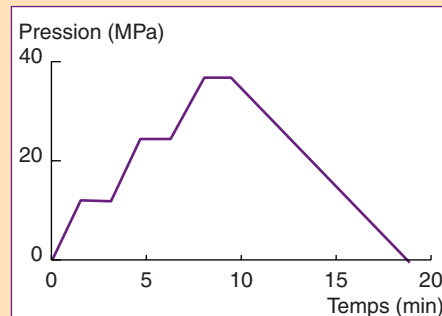


Fig. 2 - Courbe de compactage.

## Mesure des variations dimensionnelles

Après leur démoulage les éprouvettes ont été conservées verticalement dans une ambiance à température ( $20 \pm 1$  °C) et humidité relative contrôlées. Cette dernière est obtenue à l'aide d'une solution saline saturée (nitrate de potassium) et est voisine de 90 %. Pour une conservation étanche, les éprouvettes sont placées verticalement dans une enveloppe hermétique (fig. 3).

Les variations dimensionnelles ont été mesurées au moyen d'un capteur à transformateur différentiel dont la tige repose sur la pastille de PVC placée au centre de la face supérieure des éprouvettes. La précision de l'ensemble de la chaîne de mesure est de  $\pm 1 \mu\text{m}$  soit un  $\Delta L/L = \pm 5 \times 10^{-6}$ . La durée totale

de préparation d'une éprouvette depuis la mise en contact des matériaux jusqu'à son extraction du moule est de 45 à 60 min. La mesure commence 5 à 8 min après le démoulage de l'éprouvette.

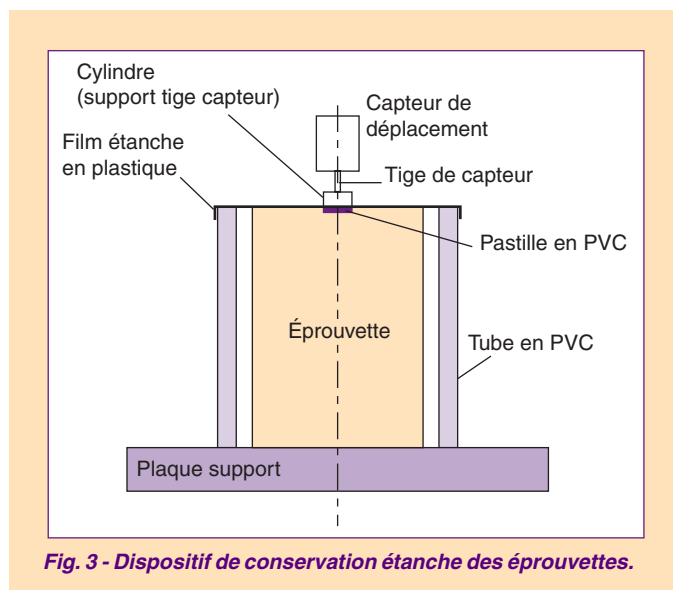


Fig. 3 - Dispositif de conservation étanche des éprouvettes.

## Résultats et discussion

En absence d'échange d'eau avec le milieu extérieur, la variation dimensionnelle mesurée est la résultante de deux phénomènes [3, 4] qui agissent en sens inverse sur les déformations des éprouvettes de sables-laitiers :

1. un phénomène de gonflement que produit la cristallisation des hydrates dans l'espace intergranulaire ;
2. un phénomène de retrait qu'engendrent les déplacements de l'eau vers les centres actifs, lieu des réactions d'hydratation.

Ces deux phénomènes sont liés à l'hydratation. Deux cas extrêmes peuvent être envisagés :

1. si l'hydratation donne lieu à des produits de cristallisation très expansifs sans provoquer de déplacement d'eau au sein des éprouvettes, un gonflement pur est obtenu ;
2. si l'hydratation provoque le déplacement d'une grande quantité d'eau au sein de l'éprouvette sans donner lieu à des produits de cristallisation expansifs, cela se traduit par un retrait pur.

En réalité, ces deux phénomènes coexistent et peuvent être tous les deux assez importants lors de l'activation du laitier au gypsonat puisque l'ettringite est un produit très expansif qui fixe également beaucoup d'eau.

L'activation au gypsonat conduit à la formation des CSH et d'ettringite comme le montre la figure 4. Activé à la chaux, le laitier s'hydrate en  $C_4AH_{13}$  et CSH (fig. 5).

Fig. 4 - Diffractométrie des rayons X du laitier activé au gypsonat B (60 jours).

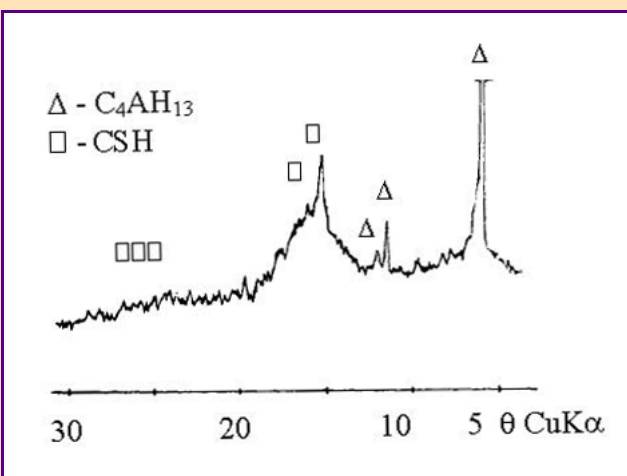
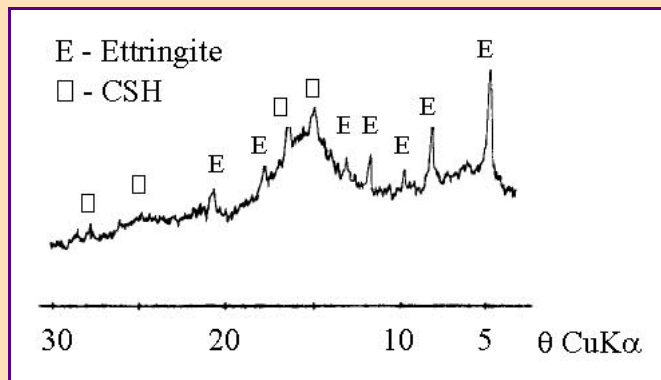


Fig. 5 - Diffractométrie des rayons X du laitier activé à la chaux (60 jours).

Lors de l'hydratation, en absence d'échange d'eau avec le milieu extérieur, le déplacement de l'eau au sein des éprouvettes est vraisemblablement dû à un écart entre les volumes absolus des hydrates formés et la somme des volumes absolus initiaux des anhydres et de l'eau (c'est le phénomène de contraction Le Chatelier). L'hydratation engendre une diminution du volume absolu total. Le vide ainsi créé serait à l'origine de la dépression de l'eau capillaire.

En revanche, le gonflement est lié au volume apparent des produits d'hydratation. La première cause de gonflement est, *a priori*, dépendante de la nature et de la quantité d'hydrates formés ainsi que des caractéristiques de la matrice granulaire et des vides dans lesquels les hydrates se développent. À cet égard, l'ettringite est, de par sa morphologie, un hydrate très expansif.

À ces derniers phénomènes, intimement liés à l'hydratation, s'ajoute l'effet de l'échange d'eau avec le milieu extérieur qui introduit un paramètre supplémentaire susceptible de modifier les variations dimensionnelles des mélanges de sables-laitiers en cours d'hydratation.

En effet, l'évaporation de l'eau des éprouvettes de sables-laitiers n'a lieu que si la pression partielle de la vapeur d'eau du milieu ambiant est inférieure à celle de la saturation. Si tel est le cas, l'évaporation commence à se produire [4, 5] à partir des molécules d'eau libres situées à la surface de l'éprouvette. L'évaporation continue à se produire à partir de l'eau interstitielle. Il y a donc progres-

sion du front d'évaporation vers l'intérieur des éprouvettes. L'eau interstitielle est en dépression et l'édifice minéral, soumis alors à une véritable pression hydrostatique, se contracte.

L'évaporation a pour effet d'augmenter la pression hydrostatique, laquelle, en absence d'échange avec le milieu extérieur, est due à un déséquilibre hydrique régi essentiellement par les réactions d'hydratation.

## Éprouvettes de sables-laitiers (L)

Nous avons réalisé deux types d'essai en vue de montrer l'influence supplémentaire de l'évaporation de l'eau sur les variations dimensionnelles spontanées des éprouvettes de sables-laitiers :

- le premier avec des éprouvettes de sable (L) activées au gypsonat B ;
- le second avec le même type d'éprouvettes, l'activant étant substitué par un filler calcaire de même granularité.

Les résultats sont présentés sur la figure 6. Lorsque l'éprouvette est activée, on observe dans un premier temps un gonflement assez bref, suivi dans un second temps d'un retrait. Par contre, lorsque l'éprouvette n'est pas activée, on observe uniquement un retrait dès le début de la mesure.

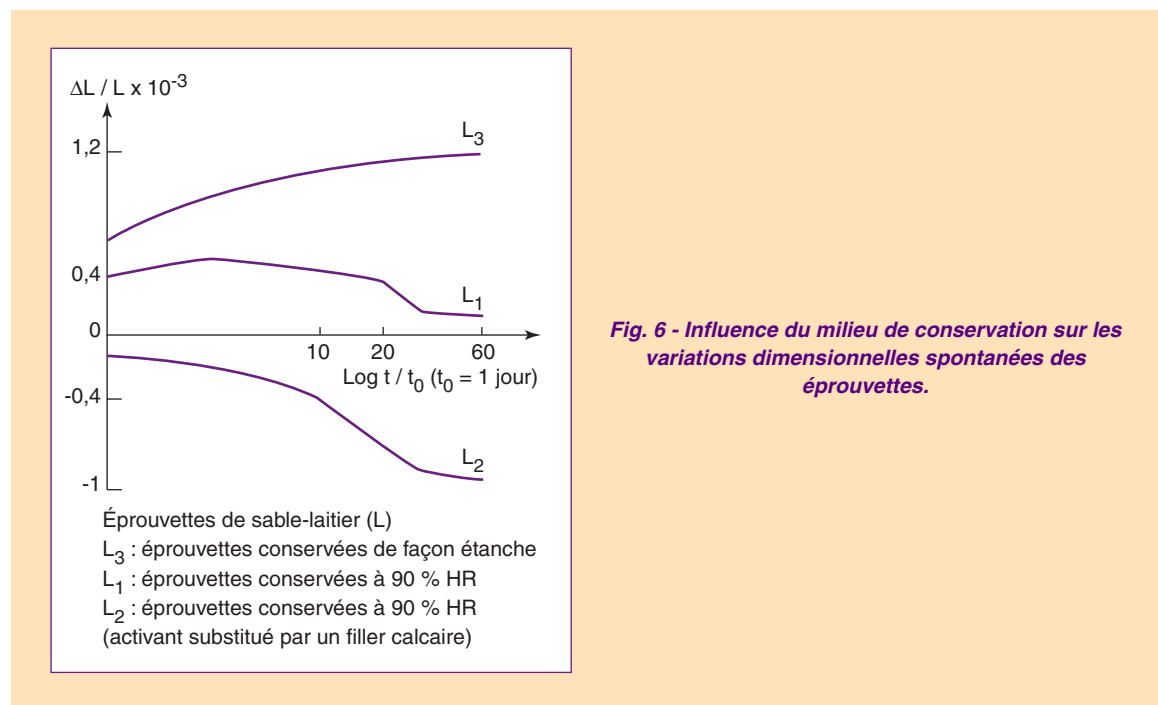


Fig. 6 - Influence du milieu de conservation sur les variations dimensionnelles spontanées des éprouvettes.

Il apparaît alors qu'aux deux principaux phénomènes, liés à l'hydratation, qui agissent sur les variations dimensionnelles spontanées observées sur les éprouvettes de sables-laitiers conservées de façon étanche (courbe L<sub>3</sub>), vient s'ajouter l'effet de l'évaporation qui se traduit par une plus grande tendance au retrait des éprouvettes (courbe L<sub>1</sub>) due à un accroissement de la pression hydrostatique de l'eau interstitielle.

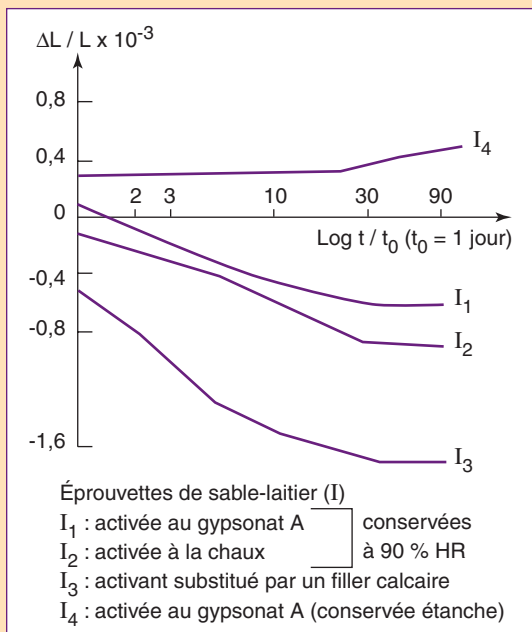
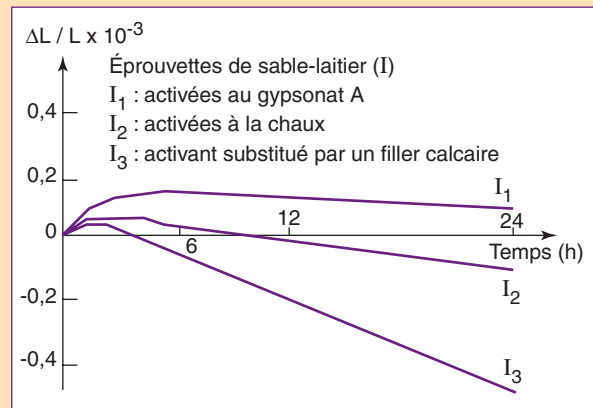
## Éprouvettes de sables-laitiers (I)

Nous traitons ici de l'influence de la nature de l'activant, d'une part, et de celle des dimensions capillaires, d'autre part.

Les résultats des essais entre 0 et 24 heures et à plus long terme sont reportés respectivement sur les figures 7 et 8. On observe un retrait plus faible, tant au cours des premières 24 heures que dans les jours qui suivent, lorsque les éprouvettes sont activées au gypsonat. Le plus grand retrait est constaté sur les éprouvettes non activées. On peut alors parler d'un plus grand gonflement des éprouvettes activées au gypsonat par rapport à celles activées à la chaux.

À la différence des éprouvettes préparées avec le sable (L), celles fabriquées avec le sable (I) ont dans tous les cas une vitesse et une amplitude de retrait plus grandes. Cela peut s'expliquer par le fait que les éprouvettes confectionnées avec le sable (I) ont des capillaires beaucoup plus fins (les éprouvettes confectionnées avec le sable (I) ont une porosité initiale de 0,163 contre 0,238 lorsqu'elles sont confectionnées avec le sable (L)). La pression hydrostatique est alors plus élevée dès lors que l'eau interstitielle est plus fortement liée.

**Fig. 7 - Influence de la nature de l'activant sur les variations dimensionnelles spontanées.**



**Fig. 8 - Influence du milieu de conservation et de la nature de l'activant sur les variations dimensionnelles spontanées.**

## Conclusion

Nous avons constaté que, si les éprouvettes de sables-laitiers activées sont conservées à une humidité inférieure à la saturation (90 % dans le cas présent), elles présentent systématiquement un retrait après quelques heures de conservation. Le retrait observé se produit suite à une évaporation de l'eau interstitielle. Il y a donc retrait d'une part et mise en dépression de l'eau nécessaire à l'hydratation d'autre part. Par contre, lorsque l'évaporation est empêchée, on observe un gonflement d'origine chimique qui dépend, *a priori*, du caractère plus ou moins expansif des hydrates formés. On peut alors affirmer que l'échange d'eau avec le milieu extérieur influence fortement les variations dimensionnelles spontanées du matériau et conditionne par son intensité la valeur de l'amplitude des déformations.



Enfin, cette étude non exhaustive a montré qu'il existe trois facteurs essentiels qui agissent sur les variations dimensionnelles spontanées des matériaux hydrauliques en cours d'hydratation : deux phénomènes antagonistes, un gonflement chimique et un retrait hydrique, entièrement liés à l'hydratation, auxquels s'ajoute un retrait dû à la dessiccation liée au départ de l'eau du matériau vers le milieu extérieur.

Dans la pratique, l'évaporation de l'eau constitutive du matériau n'est pas totalement empêchée. L'utilisation d'un activant puissant tel que le gypsonat sursodé est très intéressante. En effet, les hydrates expansifs permettent une compensation du retrait. Une cure est toujours indispensable du fait de la lenteur de la prise et du durcissement du liant.

---

#### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [1] PRANDI E., *Rapport de recherche sur les formulations des sables-laitiers*, LCPC, **1986**.
- [2] Manuel technique des graves-laitiers et des sables-laitiers, *Revue laitier de hauts fourneaux*, éditée par CTPL , numéro spécial **56, 2/1984**.
- [3] BRAHMA A., OLLIVIER J.-P., DÉTRICHÉ C.-H., Analyse expérimentale des variations dimensionnelles spontanées des sables-laitiers en cours d'hydratation, *Matériaux et constructions*, vol. 33, avril **2000**.
- [4] BRAHMA A., *Étude des variations dimensionnelles spontanées des sables-laitiers en cours d'hydratation*, Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, **1986**.
- [5] DÉTRICHÉ C.-H., *Contribution à l'étude du comportement des couches minces de liants hydrauliques. Application aux mortiers*, Thèse de docteur ès-sciences, Toulouse, **1983**.