

Influence du vent sur le comportement des bétons au très jeune âge

E. Mbemba ⁽¹⁾, P. Devillers ⁽¹⁾, A. Loukili ⁽²⁾

(1) Centre de matériaux de Grande Diffusion, Ecole des Mines d'Alès, 6 avenue de Clavières 30319 Alès cedex, France.

(2) Institut de recherche en Génie Civil et Mécanique, Ecole Centrale de Nantes, 1 rue de la Noë, BP 92101, 44321 Nantes cedex 3, France.

Elanga.Mbemba@mines-ales.fr

Philippe.Devillers@mines-ales.fr

Ahmed.Loukili@ec-nantes.fr

RESUME. Les travaux réalisés présentent une étude expérimentale du comportement des bétons au très jeune âge. Trois bétons présentant un volume de pâte, un rapport gravier/sable (G/S) et une maniabilité identique mais trois rapports eau efficace/ciment (E_{eff}/C) différents ont été étudiés. Les essais ont été réalisés dans un tunnel ventilé permettant d'imposer un flux d'air uniforme pendant l'essai, en maintenant une température et une hygrométrie constante. Les essais ont montré que lorsque ces trois bétons ne sont pas protégés, ils ont fissuré très tôt (avant le début de prise) dans des conditions sévères (dispositif de retrait empêché) que ce soit avec ou sans vent. Pour étudier le phénomène, des mesures de l'évaporation, de la dépression capillaire et des déformations longitudinales horizontales ont été effectuées pour les trois bétons avec ou sans vent.

ABSTRACT. An experimental study is made in our laboratory in order to explain the concrete behavior at very early age. Three concretes having the same paste volume, gravel/sand ratio (G/S), an identical workability and three different effective water/cement ratios (W_{eff}/C) were studied. The tests were realized in a ventilated tunnel allowing to impose a uniform wind speed during the experiment, while maintaining a constant temperature and a constant hygrometry. The tests showed that when these concretes are not protected, they cracked very early (before the beginning of set) in severe conditions (restrained shrinkage) whether it is with or without wind. The cracking risk of concrete surface at the very early age is linked to the migration of a part of the excess water outside the concrete which generates very important dimensional variations. To study the phenomenon, measurements of evaporation, capillary depression and horizontal longitudinal deformations were made for the three concretes with or without wind.

MOTS-CLES. Retrait plastique, fissuration au jeune âge, séchage.

KEYWORDS. Plastic shrinkage, early-age cracking, drying.

1 Introduction

Le retrait plastique, provoqué par l'évaporation de l'eau à la surface du béton frais, est une déformation qui se produit avant durcissement (Almussallam, 2001, Holt et al., 2004, Radocea, 1994, Witman, 1976, Uno, 1998). C'est un mécanisme identique à celui qui se produit dans les sols fins ou argileux (Peron et al., 2006) des zones de marnage lorsque l'eau se retire. Il peut en résulter une fissuration superficielle de l'ouvrage, parfois très ouverte, mais peu profonde. Ce retrait, d'origine exogène, se manifeste tant que le béton est plastique (avant et/ou au tout début de la prise), et dès que le béton est en déséquilibre hydrodynamique avec le milieu ambiant.

Dans la littérature, ce retrait est souvent attribué aux tensions capillaires ^[4]. Il s'agit d'un séchage avec départ d'eau vers l'extérieur. Le développement de la dépression capillaire semblerait être à l'origine du retrait plastique et de la fissuration précoce du matériau ^[6].

Des travaux récents ont montré que le risque de fissuration au très jeune âge est un problème complexe qui n'est pas uniquement lié aux déformations plastiques du béton frais. Le risque de fissuration existe lorsque la dépression capillaire dans le béton devient supérieure à la pression d'entrée d'air. A cet instant, de l'air pénètre dans le béton frais et amorce la fissuration (Slowick et al., 2008, Slowick et al. 2009).

Cet article tente de mettre en lumière l'influence du vent sur le comportement des bétons à l'état plastique, en vue de pouvoir limiter le risque de fissuration précoce. Pour ce faire, une étude expérimentale sur le comportement des bétons aux très jeunes âges a été menée. Trois bétons présentant un volume de pâte, un rapport G/S et une maniabilité identique mais trois rapports E_{eff}/C différents ont été mis au point pour cette étude. Les essais ont été réalisés dans un tunnel ventilé permettant d'imposer une vitesse de vent uniforme durant tout l'essai, tout en maintenant une température et une hygrométrie constante. Des mesures de l'évaporation et des déformations longitudinales horizontales ont été effectuées pour les trois bétons avec ou sans vent, afin d'étudier le comportement du béton vis à vis du séchage.

2 Matériels et méthodes

2.1 Formulation des bétons

Un ciment Portland CEM I 52,5 N a été utilisé pour l'ensemble de la campagne expérimentale. Les granulats, de nature silico-calcaires, sont un sable recomposé (0/4) et un gravier roulé (5,6/11,2). L'adjuvant utilisé est un superplastifiant haut réducteur d'eau. Le tableau 1 donne la composition des trois bétons étudiés. Le rapport gravier/sable est égal à 1,23, il est identique pour l'ensemble des trois

formulations. Un critère de maniabilité a été retenu pour les trois bétons : l'affaissement au cône d'Abrams est de 15 ± 3 cm. La mise en place du béton dans les moules se fait par vibration. Le temps de début de prise Vicat a été déterminé sur des bétons tamisés à 4 mm. Les échantillons n'ont pas été immergés dans l'eau, ils ont été protégés par un produit de cure, afin d'obtenir une meilleure précision des mesures.

Tableau 1. Composition des trois bétons

Constituants pour 1 m ³ de béton	$E_{\text{eff}}/C = 0,60$	$E_{\text{eff}}/C = 0,45$	$E_{\text{eff}}/C = 0,35$
Ciment (kg)	300	350	400
Sable (kg)	818	831	828
Gravier (kg)	1008	1023	1016
Superplastifiant (% masse de ciment)	0,4	0,95	1,85
Eau efficace(kg)	180	158	140
Temps de début de prise Vicat (heures)	4 ($\pm 0,17$)	3,4 ($\pm 0,10$)	3,17 ($\pm 0,18$)

2.2 Dispositifs expérimentaux

Les essais, réalisés sur une durée de 24h, ont eu lieu dans un tunnel ventilé (figure 1), de section 0,6m x 0,15m et, de longueur 3 m, permettant d'imposer une vitesse de vent de $5 \pm 0,5$ m.s⁻¹. Ce tunnel est placé dans une salle climatisée régulée en température ($T=21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$) et en hygrométrie ($\text{HR}=53\% \pm 4\%$).

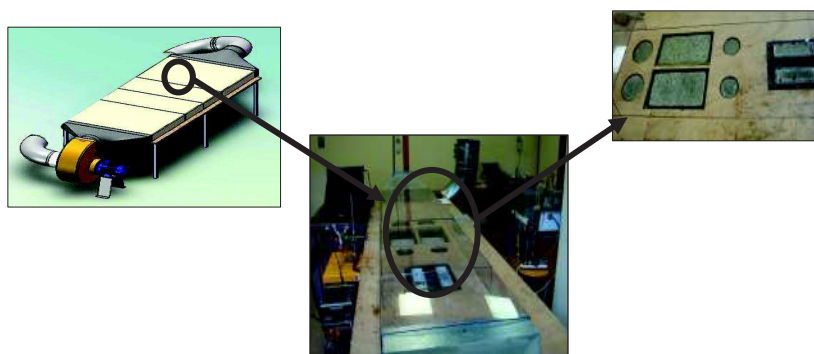


Figure 1. Schéma du dispositif expérimental de la soufflerie

La calibration de ce tunnel ventilé a consisté à effectuer des mesures de la vitesse du vent à différents emplacements, pour différentes vitesses de rotation du ventilateur. Les résultats de ces essais de calibration ont montré l'existence d'un très faible gradient de vitesse de vent, notamment pour une vitesse de 5 m.s^{-1} . Ce tunnel ventilé permet donc d'obtenir une circulation d'air uniforme dans toute l'enceinte, durant tout l'essai, et ce sans aucune perturbation du flux. Un anémomètre placé en aval permet de contrôler la vitesse du vent dans le tunnel, tandis qu'un hygromètre, placé en amont permet de contrôler l'humidité relative et la température à l'intérieur du tunnel. La circulation d'air se fait en circuit ouvert pour éviter toute élévation de la température dans le tunnel. En effet, lors de la mise au point du tunnel, des essais effectués en circuit fermé ont montré qu'il était impossible de garantir une température de 21°C durant toute la durée de l'essai.

La mise en place du béton dans les moules, puis des moules dans le tunnel ventilé nécessite environ 25 minutes. En moyenne, le démarrage des essais s'effectue donc 25 minutes après introduction de l'eau dans le malaxeur.

3 Résultats

3.1 Sensibilité à la fissuration

La fissuration a été caractérisée au moyen d'un essai de retrait empêché développé par Turcry et al. (Turcry et al., 2006). Que ce soit avec ou sans vent, les trois bétons, lorsqu'ils sont non protégés, ont fissuré. La figure 2 donne les résultats de l'étude de la sensibilité à la fissuration des trois bétons. Les valeurs de la figure 2 correspondent à des moyennes obtenues sur au moins trois échantillons. La mise en relation du tableau 1 et de la figure 2 montre que la fissuration a systématiquement eu lieu avant le début de prise, lorsque le béton est à l'état plastique.

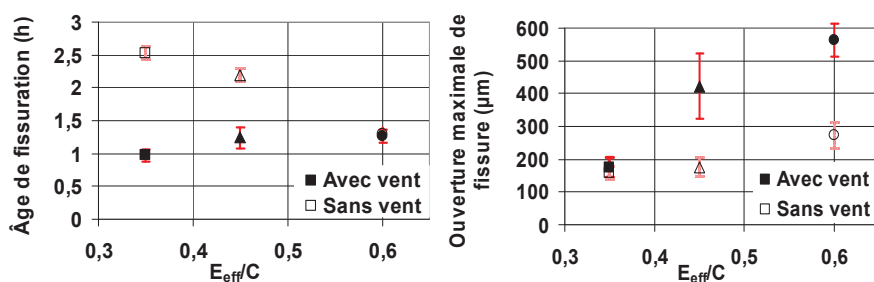


Figure 2. Âge et ouverture maximale de fissure

Influence du vent sur le comportement des bétons au très jeune âge

Sans vent, l'âge de fissuration semble diminuer lorsque le rapport E_{eff}/C augmente. L'inverse a été constaté en présence de vent. Pour le béton de rapport $E_{eff}/C=0,60$, le vent ne semble pas influencer l'âge de fissuration.

Que ce soit avec ou sans vent, l'ouverture maximale de fissure augmente lorsque le rapport E_{eff}/C augmente. Pour le béton de rapport $E_{eff}/C=0,35$, le vent ne semble pas influencer l'ouverture maximale de fissure.

3.2 Mesure de l'évaporation

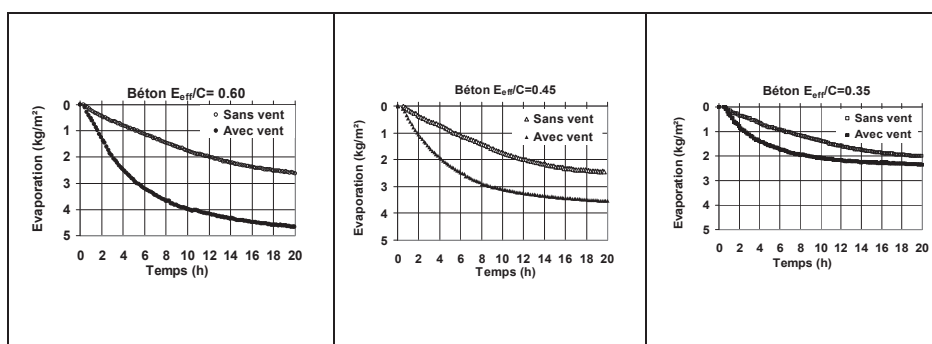


Figure 3. Évaporation des trois bétons avec et sans vent

La figure 3 présente les résultats des mesures de l'évaporation. Toutes les courbes démarrent par une partie linéaire. La pente de cette partie linéaire permet de calculer le flux initial d'évaporation (tableau 2). Que ce soit avec ou sans vent, les courbes restent linéaires pendant une certaine durée t_i qui augmente lorsque le rapport E_{eff}/C augmente (figure 3 et tableau 3). Les courbes sont ensuite fortement non linéaires, le flux d'évaporation diminue. Que ce soit avec ou sans vent, la fissuration a lieu pendant la période où les courbes d'évaporation sont linéaires.

Sans vent, le flux initial d'évaporation est pratiquement indépendant du rapport E_{eff}/C et semble peu influencé par les caractéristiques physiques du béton (figure 3 et tableau 2). Le flux d'évaporation d'une surface d'eau libre mesuré dans les mêmes conditions est de $0,14 \text{ kg/m}^2/\text{heure}$. Quel que soit le rapport E_{eff}/C considéré, le flux initial d'évaporation est donc voisin de celui d'une surface d'eau libre.

Avec vent, le flux initial d'évaporation augmente lorsque le rapport E_{eff}/C augmente et semble fortement influencé par les caractéristiques physiques du béton (figure 3 et tableau 2). Le flux d'évaporation d'une surface d'eau libre mesuré dans les mêmes conditions est de $0,41 \text{ kg/m}^2/\text{heure}$. Quel que soit le rapport E_{eff}/C

considéré, le flux initial d'évaporation est donc supérieur à celui d'une surface d'eau libre.

Pour les rapports $E_{eff}/C=0,35$ et $E_{eff}/C=0,45$ le flux initial d'évaporation avec vent est environ trois fois plus grand que celui déterminé sans vent. Pour le rapport $E_{eff}/C=0,60$ le flux initial d'évaporation avec vent est environ quatre fois plus grand que celui déterminé sans vent. Quel que soit le rapport E_{eff}/C considéré, les temps t_i obtenus avec vent sont inférieurs aux temps t_i obtenus sans vent (tableau 3). Ceci peut s'expliquer par un flux initial d'évaporation beaucoup plus important avec vent que sans vent.

Tableau 2. Flux d'évaporation des trois bétons

	Flux d'évaporation (kg/m ² /heure)	
	Sans vent	Avec vent
$E_{eff}/C=0,60$	0,180	0,700
$E_{eff}/C=0,45$	0,170	0,510
$E_{eff}/C=0,35$	0,151	0,450

Tableau 3. Temps t_i pendant lequel l'évaporation est linéaire en fonction du temps

	Temps t_i (heures)	
	Sans vent	Avec vent
$E_{eff}/C=0,60$	10,8	4,5
$E_{eff}/C=0,45$	9,1	3,3
$E_{eff}/C=0,35$	7,1	2,3

3.3 Mesure des déformations longitudinales horizontales

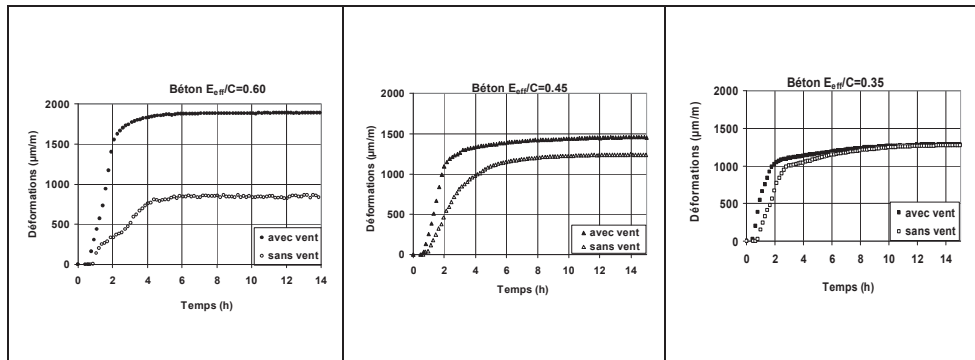


Figure 4. Déformations longitudinales des trois bétons avec et sans vent

La figure 4 représente les déformations longitudinales corrigées des effets thermiques, avec et sans vent. Toutes les courbes démarrent par une partie linéaire. La pente de cette partie linéaire permet de calculer la vitesse initiale de déformation (figure 4 et tableau 4). On constate, avec ou sans vent, que la vitesse initiale de déformations diminue lorsque le rapport E_{eff}/C augmente. En présence de vent, la vitesse initiale de déformation est plus importante que sans vent. Pour le rapport $E_{eff}/C=0,6$, la cinétique de déformation fait apparaître deux pentes initiales (figure 4). La seconde pente est supérieure à la première (tableau 4). Les courbes restent linéaires pendant une certaine durée t_j qui augmente lorsque le rapport E_{eff}/C augmente. Les courbes sont ensuite fortement non linéaires, les vitesses de déformation diminuent jusqu'à devenir nulles. Quel que soit le rapport E_{eff}/C considéré, les temps t_j obtenus sans vent sont supérieurs aux temps t_j obtenus avec vent. Ceci peut s'expliquer par une vitesse initiale de déformation plus faible sans vent qu'avec vent.

Tableau 4. Vitesses moyennes initiales de déformations longitudinales ($\mu\text{m}/\text{m}/\text{heure}$)

	Avec vent		Sans vent	
	1 ^{er} régime	2 ^{ème} régime	1 ^{er} régime	2 ^{ème} régime
$E_{eff}/C = 0,60$	722	1361	278	389
$E_{eff}/C = 0,45$	842	-	410	-
$E_{eff}/C = 0,35$	929	-	524	-

Tableau 5. Déformations longitudinales 8 heures après démarrage de l'essai

Bétons	Déformations à 8h ($\mu\text{m}/\text{m}$)	
	Sans vent	Avec vent
$E_{eff}/C = 0,60$	930	1930
$E_{eff}/C = 0,45$	1147	1474
$E_{eff}/C = 0,35$	1170	1118

La mise en relation des figures 2 et 4 montre que la fissuration a lieu pendant la phase où les déformations sont linéaires en fonction du temps sauf pour la formulation $E_{eff}/C = 0,35$ pour laquelle, sans vent, la fissuration intervient juste après la fin de la phase linéaire. Dans ces conditions, le béton frais reste proche de la saturation. Le tableau 5 donne les déformations longitudinales mesurées 8 heures après le démarrage de l'essai, corrigées des effets thermiques. On constate que pour le rapport $E_{eff}/C = 0,35$, les déformations obtenues 8 heures après le démarrage de l'essai sont du même ordre de grandeur avec ou sans vent. Par contre, lorsque le rapport E_{eff}/C augmente l'écart entre les déformations obtenues avec et sans vent augmente : pour le rapport $E_{eff}/C = 0,6$, les déformations obtenues en présence de vent sont deux fois supérieures à celles obtenues sans vent. Cette tendance est

identique à celle observée pour l'ouverture de fissure. La mise en relation de la figure 2 et du tableau 5 montre qu'il existe une bonne corrélation entre l'ouverture maximale de fissure et les déformations longitudinales.

4 Synthèse et discussion

A la sortie du malaxeur, le béton frais est en déséquilibre thermodynamique avec le milieu ambiant. Le séchage va lui permettre de retrouver, très lentement, un équilibre hydrique avec le milieu ambiant. Lors du séchage, les milieux poreux déformables restent saturés jusqu'à l'entrée d'air. Pour que le milieu poreux reste saturé, le volume d'eau évaporée doit instantanément être occupé par la phase solide. Les variations de volume de l'échantillon sont alors égales au volume d'eau évaporée. Pour assurer un flux de masse constant à la surface, il faut que la pression de l'eau diminue, ce qui conduit au développement de la dépression capillaire. Les valeurs de la dépression capillaire ou de la pression de l'eau sont donc directement liées à l'aptitude du béton frais à se déformer, c'est-à-dire qu'elles dépendent des paramètres mécaniques du milieu granulaire humide. Par contre, les gradients de pression d'eau ou de dépression capillaire ainsi que leurs évolutions n'ont pas de forte liaison avec la déformation du milieu, ils sont liés plutôt à la facilité avec laquelle le fluide peut s'écouler dans le milieu c'est-à-dire à la perméabilité du béton frais.

L'extraction de l'eau d'un milieu poreux, généralement appelée séchage, est le plus souvent interprétée par l'intermédiaire de la cinétique de séchage. L'observation des cinétiques d'évaporation de l'eau en milieu capillaro-poreux soumis à une atmosphère séchante contrôlée fait généralement apparaître trois périodes de séchage : une première période durant laquelle la vitesse est constante, une deuxième période qui correspond à un premier ralentissement de la vitesse suivie d'une troisième période qui correspond à une seconde décroissance de la vitesse (Moyné, 1987, Yanful et al., 1997).

Pour l'étude du comportement des bétons au très jeune âge, seule la première période, correspondant à un flux d'évaporation constant nous intéresse. L'interprétation du séchage la plus fréquemment adoptée, se base sur l'identification des différents modes de transport de matière qui se succèdent (Nadeau et al., 1995). Durant la première période à vitesse constante le séchage provoqué par les caractéristiques de l'atmosphère extérieure se traduit par un transport d'eau liquide jusqu'à la surface séchante, modélisé par la relation de Darcy généralisée. Cette période est donc associée au domaine funiculaire. Durant cette phase, la vitesse d'évaporation de l'eau dans le béton est supérieure à la vitesse d'évaporation d'une surface d'eau libre. Ceci peut être attribué à la rugosité de la surface du béton qui augmente la surface d'échange béton/atmosphère séchante.

Pour les milieux poreux les moins déformables et peu perméables la vitesse de séchage est plus faible et la montée de la dépression capillaire est très forte. C'est le

cas pour le séchage avec vent du béton de rapport $E_{eff}/C=0,35$ pour lequel la première phase de développement de la dépression capillaire n'existe pas (figure 5). La dépression capillaire se développe rapidement à une vitesse voisine de 15 kPa/heure. C'est également pour ce béton qu'on a mesuré le plus faible flux d'évaporation en présence de vent.

Les milieux poreux très déformables et très perméables amènent à de plus fortes vitesses de séchage. La montée de la dépression capillaire est par contre plus faible. C'est le cas pour le séchage avec vent du béton de rapport $E_{eff}/C=0,60$ pour lequel la dépression capillaire se développe lentement, à une vitesse voisine de 7 kPa/heure (figure 5). C'est également pour ce béton qu'on a mesuré le plus fort flux d'évaporation en présence de vent. Le béton de rapport $E_{eff}/C=0,45$ présente un comportement intermédiaire, la dépression capillaire se développe à une vitesse de 9 kPa/heure en présence de vent.

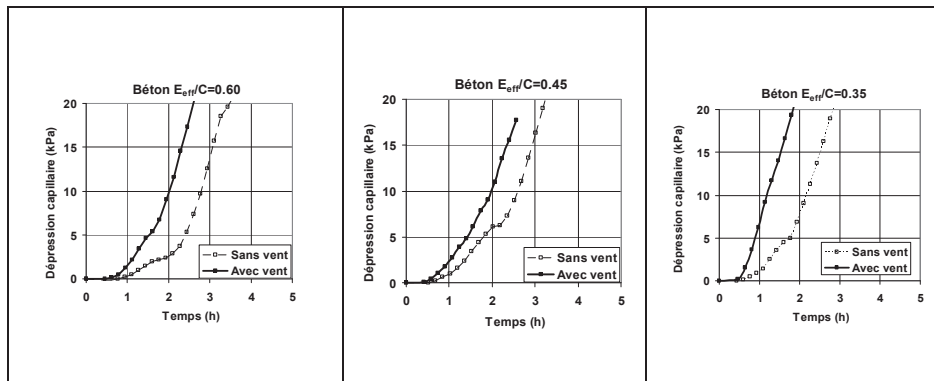


Figure 5. Dépression capillaire des trois bétons avec et sans vent

5 Conclusion

Les résultats de cette étude montrent que le comportement des bétons soumis au séchage dès leur très jeune âge présente deux étapes bien distinctes : un premier domaine durant lequel les déformations sont importantes et le béton reste proche de la saturation, suivi d'un second domaine durant lequel les déformations sont faibles et le degré de saturation diminue. Ces résultats sont similaires à ceux observés pour les sols fins soumis à la dessiccation. Les résultats montrent que pour les trois bétons, la fissuration intervient au voisinage de la saturation. Pour les bétons de bâtiment, présentant un rapport E_{eff}/C élevé, la présence de vent ne semble pas modifier l'âge d'apparition de la fissure. Par contre, l'ouverture maximale de fissure augmente de manière importante en présence de vent. Pour les bétons de génie civil, présentant un rapport E_{eff}/C faible, en présence de vent la fissuration intervient beaucoup plus tôt. Par contre, l'ouverture maximale de la fissure est identique avec ou sans vent.

En effet, la fissuration intervient pour de faibles valeurs de la dépression capillaire, voisines de la pression d'entrée d'air. Les résultats expérimentaux montrent qu'il n'existe pas de lien entre l'apparition de la fissure et les déformations plastiques du matériau. En l'absence de vent, l'évaporation est indépendante des caractéristiques du béton. Par contre, en présence de vent la capacité de déformation du béton influe sur l'évaporation : un béton frais très déformable aura une évaporation très importante, un béton frais peu déformable aura une évaporation peu importante.

6 Références

- [1]. Almusallam A.A., « Effect of environmental conditions on the properties of fresh and hardened concrete », *Cement and Concrete Composites*, Vol. 23 N°4-5 (2001) p. 353-361.
- [2]. Holt E., Leivo M., « Cracking risks associated with early age shrinkage », *Cement and Concrete Composites*, Vol. 26 N°5 (2004) p. 521-530.
- [3]. Radocea A., « A model of plastic shrinkage », *Magazine of Concrete Research*, Vol. 46 N°167 (1994) p. 125-132.
- [4]. Wittmann F.H., « On the action of capillary pressure in fresh concrete », *Cement and Concrete Research*, Vol. 6 N°1 (1976) p. 49-56.
- [5]. Perron H., Hueckel T., Laloui L., Hueckel T., Hu L., « Experimental study of desiccation of soil », *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 147 (2006) p. 1073-1084.
- [6]. Turcry P., Loukili A., « Evaluation of plastic shrinkage cracking of self-consolidating concrete », *ACI Materials Journal*, Vol. 103 N°4 (2006) p. 272-279.
- [7]. Uno J.P., « Plastic shrinkage cracking and evaporation formulas », *ACI Materials Journal*, Vol. 95 N°4 (1998) p. 365-375.
- [8]. Slowick V., Schmidt M., Fritsch R., « Capillary pressure in fresh cement-based materials and identification of the air entry value », *Cement and Concrete composites*, Vol. 30 N°7 (2008) p. 557-565.
- [9]. Slowick V., Schimdt M., Hübner T., Villmann B., « Simulation of capillary shrinkage cracking in cement-like materials », *Cement and Concrete composites*, Vol. 31 N°7 (2009) p. 461-469.
- [10]. Moyne C., *Transferts couplés chaleur-masse lors du séchage : prise en compte du mouvement de la phase gazeuse*, Thèse d'Etat de l'INPL Nancy, 1987.
- [11]. Yanful E.K., Choo L.P., « Measurement of evaporative fluxes from candidate cover soils », *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 34, p. 447-459, 1997.
- [12]. Nadeau J.P., Puiggali J.R., *Séchage, des processus physiques aux procédés industriels*, Lavoisier, Paris, 1995.