



HAL
open science

Influence du vent sur le comportement des bétons à très jeunes âges

Marie Salgues, Jean-Claude Souche, Thibaut A Marchi, Philippe Devillers,
Eric Garcia-Diaz

► To cite this version:

Marie Salgues, Jean-Claude Souche, Thibaut A Marchi, Philippe Devillers, Eric Garcia-Diaz. Influence du vent sur le comportement des bétons à très jeunes âges. NOMAD 2022 - 4e conférence internationale francophone Nouveaux Matériaux et Durabilité, IMT Mines Alès; LMGC; LIFAM, Nov 2022, Montpellier, France. hal-03879405

HAL Id: hal-03879405

<https://imt-mines-ales.hal.science/hal-03879405v1>

Submitted on 30 Nov 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Influence du vent sur le comportement des bétons à très jeunes âges

Marie Salgues¹, Jean-Claude Souche¹, Thibaut Marchi¹, Philippe Devillers², Eric Garcia-Diaz¹

¹ LMGC, IMT Mines Ales, Univ Montpellier, CNRS, Ales, France

² LIFAM, ENSA de Montpellier, Univ Montpellier, France

ABSTRACT

L'hydratation des bétons débute par une période dite « période dormante » qui voit le mélange à l'état plastique subir des transformations physiques accompagnées d'un faible dégagement de chaleur. Sous certaines conditions climatiques et en particulier le séchage convectif dû au vent, les déformations de retrait induites génèrent des contraintes au sein du béton frais qui n'a pas encore de résistance mécanique suffisante et qui fissure de façon précoce. Un des paramètres clefs est la vitesse du vent qui varie dans cette étude entre 0 m/s et 8 m/s. Le vent est simulé grâce à un banc ventilé instrumenté qui permet de mesurer également le gradient de température et de pression capillaire au sein des échantillons de béton frais au cours du temps. Les résultats ont mis en évidence un couplage entre le séchage convectif et la température mesurée au sein du béton. Sous l'effet de l'évaporation de l'eau présente dans le béton, celui-ci se refroidit, et sensiblement plus en partie supérieure de l'échantillon. En parallèle, la mesure de la pression capillaire fait apparaître un gradient de pression lié à la vitesse du vent. Cette étude met enfin en corrélation la notion de « pression d'entrée d'air » avec la fissuration de retrait plastique et avec les tailles des pores du béton qu'on peut approcher à l'aide de la théorie des empilements granulaires. Les pores impliqués par le phénomène d'entrée d'air dans le milieu poreux à la fissuration semblent être les plus gros pores de la pâte du béton. Sous l'effet du séchage, le gradient de température peut amener un effet supplémentaire au retrait plastique et favoriser la fissuration du béton au jeune âge.

Keywords dessiccation, retrait plastique, retrait thermique

I. INTRODUCTION

La vie d'un béton commence quand on mélange les constituants dans le malaxeur. Immédiatement des phénomènes physico-chimiques se produisent et voient cet ensemble de matériaux se transformer en une pâte épaisse que nous appelons le béton frais. Celui-ci prend alors une deuxième vie quand on le met en place dans le coffrage car immédiatement les forces de gravité et l'environnement extérieur commencent à influencer sa microstructure. Au très jeune âge avant la prise qui représente la troisième transformation de la vie du béton où il passe alors de l'état pâteux à l'état de solide et où il acquiert des caractéristiques mécaniques et des propriétés de transfert. A ce stade le béton est donc un mélange d'eau et de particules solides de différents diamètres et l'espace poreux du mélange est occupé par l'eau qui est assimilable à un ensemble de capillaires continus (Powers, 1968).

Cette richesse du béton en eau, contrairement à l'air extérieur (RH usuellement compris entre 50 et 70 %), induit un transfert d'eau de l'intérieur du béton vers la surface où le fluide est arraché par séchage (Ollivier and Torrenti, 2008), souvent sous l'effet du vent. En parallèle, sous l'effet de la gravité, les particules solides sont soumises à un tassement qui provoque la remontée de l'eau vers la surface pour être stockée sous la forme d'une fine pellicule d'eau, c'est le phénomène de ressuage (Josserand, 2002) qui précède le phénomène de retrait plastique (Turcry, 2004), (Turcry and Loukili, 2006).

Suite à cette première phase et sous l'effet du séchage, deux phénomènes vont donc entrer en compétition, le ressuage qui va permettre d'alimenter la surface en eau, depuis l'intérieur du béton et durant un temps limité et le séchage qui va évaporer cette eau depuis la surface du béton vers le milieu environnant. Il en résulte un gradient d'humidité entre l'intérieur du béton et la surface du béton en équilibre avec le milieu extérieur qui conduit à la mise en place d'un gradient de dépressions capillaires au sein de ménisques près de la surface qui vont progressivement pénétrer dans le béton. Ce phénomène de tension du fluide dans les pores s'accompagne d'efforts de traction dans le matériau qui n'a alors pas de résistance suffisante pour s'y opposer ce qui conduit à la fissuration plastique du béton. (Radocea, 1990) (Slowik, Schmidt and Fritsch, 2008).

Le but de cette étude est de mesurer plus précisément l'évolution du flux de séchage en fonction de la vitesse de vent dans des conditions de séchage sévère (RH = 34%) sur un béton de génie civil de rapport E/C = 0,45. L'objectif est aussi de mettre en évidence le gradient des pressions capillaires d'une part mais aussi le gradient de températures qui existe entre le haut et le bas de l'échantillon, gradient qui a déjà été mesuré dans les travaux de (Souche, 2015).

II. PROGRAMME EXPERIMENTAL

Matériaux utilisés et formulation

Un ciment CEM I 52.5 N a été utilisé pour la confection du béton testé. Il a été associé à un sable 0/4 (absorption de 0,8 % et masse volumique de 2650 Kg/m³) et un gravier naturel 4/16 (absorption de 1,2 % et masse volumique de 2640 Kg/m³). Un superplastifiant a également été utilisé. Le béton obtenu est un C40/50 de résistance moyenne en compression égale à 51,6 MPa à 28 jours soit une

résistance caractéristique de 43,6 MPa (selon la formule de l'EC2). L'affaissement au cône d'Abrams est de 21,5 cm, soit un béton de classe S4. Le tableau 1 précise les caractéristiques du béton utilisé qui est issu du travail de T. Marchi :

TABLEAU 1. Caractéristiques du béton utilisé (Marchi *et al.*, 2022)

(Kg/m ³ de béton)	Graviers naturels (6/16)	Sable mixte (0/4)	Ciment CEM I 52,5 N	Superplastifiant Prémia 180	Eau efficace	Ratio E_{eff} / C	Air entraîné %
Qtés de matériaux constituant le béton	981	768	439	2,43	188	0,43	1

Moyens expérimentaux

Les essais ont été réalisés sur une durée de 3 heures. La soufflerie est mise en route 15 minutes environ après insertion de l'eau dans le malaxeur. L'origine du temps des courbes est le démarrage du tunnel ventilé (figure 1) sous un vent de 0, 5 et 8 m.s⁻¹ ($\pm 0,5$ m.s⁻¹). Le tunnel est en circuit ouvert sur une salle régulée en température et en hygrométrie (T=23°C ± 1 °C et HR=34% ± 4 %).



FIGURE 1. Banc de test pour la production d'un flux de vent (à gauche turbine, à droite, moules et moyens de mesures)

Le tunnel ventilé est connecté au ventilateur, qui consiste en une turbine centrifuge montée en série avec un moteur électrique positionné sur silentblocs. Le banc est équipé de sondes de contrôles hygrométriques et thermiques en amont et en aval pour permettre de surveiller la température et le degré hygrométrique au sein de celui-ci au cours du temps. Il présente également des réservations en vue de la mise en place des moules. Des plateformes autoélevatrices sont utilisées comme support pour les moules. La vitesse d'écoulement de l'air est maintenue uniforme à l'intérieur du banc ventilé. L'anémomètre présent en aval du tunnel permet de la contrôler.

Les moyens d'essais sont précisément décrits dans (Souche, 2015). Les capteurs utilisés dans la présente étude ont été limités aux thermocouples, aux capteurs de pression capillaire et aux mesures de la perte en eau. Les thermocouples et les capteurs de pression capillaires sont placés en haut et en bas du moule de façon à mesurer le gradient sur la hauteur de l'échantillon.



FIGURE 2. Moules et moyens de mesures
(thermocouple à gauche) (thermocouple et capteur de pression capillaire à droite)

La mesure du flux d'évaporation est obtenue à partir des pesées par balance de la perte de masse. Un moule cylindrique de 84 mm de hauteur et de 160 mm de diamètre est utilisé. La surface d'évaporation du moule est égale à 200 cm². Le flux est calculé comme la masse d'eau perdue divisée par la surface et par le temps. Il est donné en kg/m².h.

III. RESULTATS

Flux d'évaporation à la surface du béton

Le flux d'évaporation du béton frais est contrôlé par la vitesse du vent, la température et le degré d'hygrométrie (HR). Ces deux derniers sont maintenus constants dans nos expériences.

Le flux d'évaporation peut être estimé soit à l'aide de l'abaque de l'ACI 305-R (ACI305R-91, 1999), soit à l'aide de la formule de Uno (Uno, 1998). On obtient des flux de respectivement 0,11 / 0,61 et 0,91 Kg/m²/h pour nos conditions expérimentales : RH=34 %, T_c=20,2°C, T_a=23°C et V_{vent}= 0 / 18 / 28,8 km/h.

Globalement, il apparaît que les conditions environnementales, HR, Température et vent restent les paramètres majeurs du phénomène physique du séchage. Toutefois le matériau joue aussi un rôle par le biais du débit de ressuage qui permet d'alimenter et de conserver une surface "saturée" en eau et donc un débit d'évaporation fort. Il y a une compétition entre le débit de ressuage et le débit de séchage. Lorsque ce dernier devient dominant, la surface n'est plus saturée, des ménisques se forment puis rentrent dans la profondeur du matériau.

Plus HR est faible, plus la vitesse de vent est forte et plus le rapport E/C est grand, (de l'eau est disponible dans le matériau pour alimenter la surface), plus le débit d'évaporation est grand sans jamais pouvoir excéder le débit relatif à un plan d'eau libre (Zuraida, 1989) (Al-Fadhala and Hover, 2001) (Topcu and Elgun, 2004) (Mbemba, 2010) (Wei, Guo and Zhang, 2020) (Wang, 2021).

La figure 3 met en évidence l'aspect linéaire de la perte de masse et la valeur constante du coefficient d'évaporation qui est représenté par la pente des droites. Cette valeur est ici constante sur les 3 premières heures de l'expérience sans vent, jusqu'à 2,7 h environ pour une vitesse de vent de 5 m/s et plutôt 1,6 h pour une vitesse de vent de 8 m/s, ce qui est cohérent avec les mesures et résultats de la plupart des auteurs. En général, ils proposent ensuite une décroissance de la valeur du débit d'évaporation (Zuraida, 1989), concomitante avec la pénétration du flux de séchage dans le matériau (lorsque HR diffère de sa valeur à la saturation) (Wang, 2021). Nous

observons ce phénomène à partir de 1,6 h environ avec une valeur de flux qui baisse de 1,2 à 0,77 Kg/m²/h pour un vent de 8 m/s et à partir de 2,7 h environ pour un vent de 5 m/s avec un flux qui baisse de 0,78 à 0,66 Kg/m²/h.

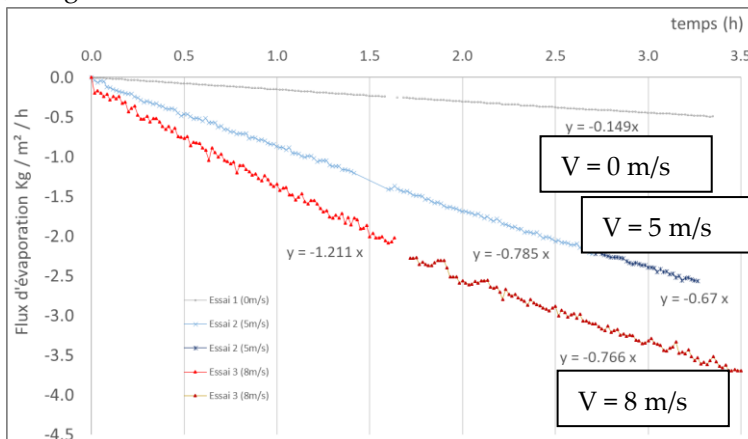


FIGURE 3. Mesure de la perte de masse rapportée à la surface de l'échantillon au cours du temps calcul du coefficient d'évaporation pour un vent de 0 / 5 / 8 m/s

Wei, Guo and Zhang, comparent l'évaporation d'une surface de béton soumise à un flux de vent avec celle d'un plan d'eau libre. Il est mis en évidence une parfaite corrélation en début d'expérience, pour tous les bétons testés (E/C = 0,4 / 0,5 / 0,6). Puis lorsque le front de séchage pénètre dans le matériau, la valeur du flux de séchage décroît pour atteindre au bout de 4 h environ une valeur constante de l'ordre de 0,5 kg/m²/h quelle que soit la vitesse de vent et le béton testé (E/C égal à 0,4 / 0,5 / 0,6) (Wei, Guo and Zhang, 2020). Le tableau 2 récapitule les valeurs théoriques calculées ainsi que quelques valeurs issues de la bibliographie mesurées dans des conditions plus ou moins similaires à cette étude. Les auteurs cités se sont intéressés aux paramètres influant sur les débits d'évaporation du béton frais en surface.

TABLEAU 2. Flux d'évaporation en fonction de la vitesse de vent (kg/m²/heure)

Flux d'évaporation initial Kg/m ² /h	Vent 0 m/s	Vent 5 m/s	Vent 8 m/s
Mesures expérimentales HR=34 %, W=0, 5, 8 m/s, T=22 °C, E/C = 0,43	0,15	0,78 0,67	1,2 0,77
HR = 50 %, W = 5, 8 m/s, T = 21 °C E/C = 0,48 (Souche, 2015)		0,6	1,0 / 1,0 *
Valeurs théoriques : <i>formule de UNO / Monographie de l'ACI 305-R</i>	0,11 0,1	0,59 0,55	0,88 0,8
<i>Valeurs issues de la bibliographie (* valeur d'évaporation mesurée sur un plan d'eau libre)</i>			
HR = 70 %, W = 5 m/s, T = 32,5 °C E/C = 0,42 (Zuraida, 1989)		1,00	
HR = 74 %, W = 5 m/s, T = 28 °C E/C = 0,42 (Zuraida, 1989)		0,79	
HR = 40 %, W = 10 m/s, T = 21 °C E/C = 0,50 (Al-Fadhala and Hover, 2001)			0,73
HR = 50 %, W = 0 / 15 m/s, T = 28 °C E/C = 0,50 (Topcu and Elgun, 2004)	0,25		0,8 à 0,7
HR = 80 %, W = 0 / 15 m/s, T = 28 °C E/C = 0,50 (Topcu and Elgun, 2004)	0,16		0,3 à 0,4
HR = 50 %, W = 0 / 5 m/s, T = 20 °C E/C = 0,45 (Mbemba, 2010)	0,17	0,51	
HR = 30 %, W = 0 / 5 / 10 m/s, T = 25 °C E/C = 0,54 (Wang, 2021)	0,13	1,14	2,1
HR = 30 %, W = 6 / 8 m/s, T = 30 °C E/C = 0,50 (Wei, Guo and Zhang, 2020)		1,7 *	2,2 *

Si les valeurs de flux proposées par les différents auteurs présentent peu de dispersion pour une vitesse de vent nulle, pour des vitesses de vent supérieures, en fonction des conditions de l'essai, (HR, Température de l'air et du béton) elles peuvent varier du simple au double. En particulier, il ressort que la vitesse de vent et la différence de température entre le béton et l'air extérieur jouent un rôle important dans le calcul du débit d'évaporation. Si le béton devient plus chaud que l'air ambiant, le débit d'évaporation augmente alors considérablement.

Globalement les valeurs mesurées dans cette étude sont plutôt au milieu de la fourchette des valeurs bibliographiques et finalement du même ordre de grandeur que les valeurs théoriques calculées à l'aide de la formule de (Uno, 1998) sauf pour une vitesse de 8 m/s. Dans tous les cas, les valeurs mesurées sont proches des valeurs de l'étude de 2015 qui concernait pourtant des bétons naturels différents et des bétons recyclés (Souche, 2015).

Les études les plus récentes s'appuient toujours sur les mêmes bases théoriques, équations de Menzel, dont l'article d'Uno propose une actualisation qui semble toujours faire référence. La compétition entre le débit de ressuage d'une part et le débit d'évaporation d'autre part est bien connue et se traduit par un flux de séchage initial proche de celui d'un plan d'eau libre. Il se maintient tant que la surface est saturée et que le débit de ressuage est supérieur au débit d'évaporation, puis il décroît quand le front de séchage pénètre dans le matériau.

Il convient alors de mesurer quels sont les effets de ce départ d'eau sur l'échantillon en fonction du temps et sur la hauteur de l'échantillon sur la température et la pression capillaire de la phase liquide qui reste continue jusqu'à la pression d'entrée d'air (Slowik, Schmidt and Fritzsche, 2008) (Souche *et al.*, 2017).

Evolution de la pression capillaire (Pc)

Dans un premier temps l'eau de ressuage s'évapore, il y a une perte de masse qui ne s'accompagne pas d'un développement de la Pc de la phase liquide, puis sous l'effet du séchage, la dépression capillaire se développe en surface puis à l'intérieur du béton provoque un état de tension hydrostatique qui entraîne un rapprochement des grains les uns par rapport aux autres puis l'air pénètre dans le système poreux, en commençant par les plus gros pores. L'entrée d'air dans le milieu poreux rend le système instable et amorce la fissuration du béton frais (Slowik and al. 2008). A cet instant, la Pc a dépassé la pression d'entrée d'air (Mbemba *et al.*, 2013).

La figure 5 ci-dessous met en lumière la mesure de Pc en fonction du temps pour les trois vitesses de vent de l'étude.

Les courbes mettent en évidence une phase initiale où la pente de la courbe est faible et où les Pc se développent peu. La durée de cette phase diminue avec l'importance du flux de séchage. Pour des vitesses de vent non nulle, la Pc se développe rapidement et la pente de la courbe s'accroît jusqu'à un point d'inflexion où le ralentissement est très marqué (la pente passe de 91 à 49 hPa/h pour le vent de 5 m/s et de 190 à 38 hPa/h pour le vent de 8 m/s). Les mesures entre le haut et le bas de l'échantillon font apparaître un décalage dans le temps et de valeurs des Pc. La mesure supérieure voit la Pc démarrer systématiquement plus vite et atteindre des valeurs plus faibles que la mesure basse, sauf pour la vitesse de vent nulle où le flux de séchage étant faible, la Pc ne se développe pas significativement.

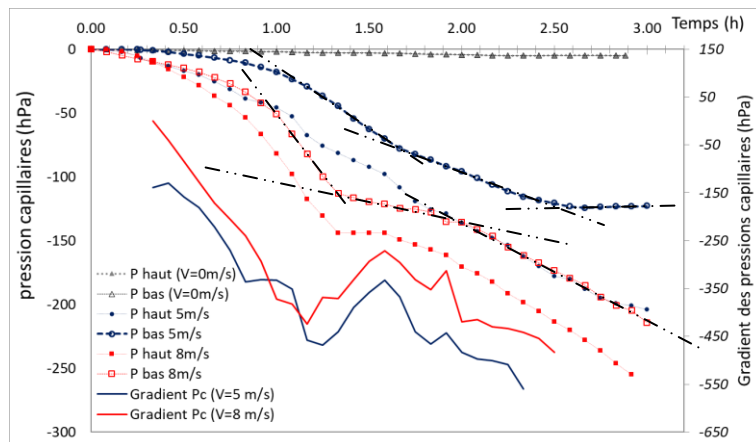


FIGURE 4. Évolution de la Pc au sein du béton en fonction du temps à deux niveaux de mesure et pour les trois vitesses de vent de 0, 5, et 8 m/s – évolution du gradient de $Pc=f(t)$ pour $V = 5$ et 8 m/s

Le vent a donc un effet très important sur le développement des Pc. A vitesse de vent nulle, la courbe est quasi stable sur les 3 premières heures sans évolution notable des valeurs mesurées. Pour un vent de 5 à 8 m/s, les Pc se développent bien plus vite et plus intensément dans le temps avec l'augmentation de la vitesse du vent. Pour autant cette dernière ne semble pas accentuer la valeur du gradient entre les deux points de mesure haut et bas dans le matériau, (de l'ordre de 350 à 450 hPa environ). Le « palier » situé entre les points 1 et 2 fait finalement apparaître une Pc de l'ordre de 80 à 130 hPa proche des valeurs de pression d'entrée d'air de bétons similaires dans des études antérieures (Slowik, Schmidt and Fritsch, 2008) (Souche, 2015). Ces valeurs de pressions sont en général synonymes de fissuration par retrait plastique, fissuration qui n'a pas été étudiée ici mais dont on peut penser assurément que l'apparition sera plus précoce pour la vitesse de vent la plus grande.

Evolution de la température

Lors de l'étude de 2015, (Souche, 2015), il avait été mis en évidence que le séchage dû à un vent violent (8 m/s) avait un effet sur la distribution des températures sur la hauteur de l'échantillon en fonction du temps. Dans cette étude on a voulu comparer le phénomène pour plusieurs vitesses de vent et vérifier la présence d'un gradient thermique sur la hauteur du béton. La figure 5 propose les mesures de température en haut et en bas de l'échantillon pour les trois vitesses de vent considérées.

Pour un vent de vitesse nulle, la variation de température est lente dans le temps, elle est due à un faible séchage qui n'est pas suffisant pour faire apparaître un gradient thermique sur la hauteur de l'échantillon, d'une manière assez similaire à ce qui est constaté pour les Pc. En revanche, pour des vitesses de vent de 5 et 8 m/s, les résultats sont tout autre. Pour 8 m/s, on obtient un ΔT de 2,3°C avec une valeur minimale atteignant les 17,5°C et pour un vent de 5 m/s, on obtient un ΔT de 1,8°C avec une valeur minimale de 18,3°C. Il est donc constaté que la baisse de température est plus forte lorsque la vitesse du vent est plus élevée et que la pente de la courbe est plus importante.

De même l'écart de température entre la mesure haute - plus rapidement et plus intensément soumise au vent - et le bas du béton s'accroît pour une vitesse de vent plus forte. Il y a quasiment deux degrés d'écart entre les mesures pour des vitesses de vent de 5 et 8 m/s. Or c'est le développement d'un gradient de température ($\Delta T / \Delta x$) entre l'intérieur de la structure plus chaude et la peau extérieure du béton plus froide qui génère des contraintes de traction pouvant induire une fissuration structurelle (Acker, Torrenti and Guérinet, 2008). Cette observation doit aussi prendre en compte le coefficient de dilatation du béton frais qui est beaucoup plus élevé que celui du matériau durci (Laplante et al 1994) (Loukili *et al.*, 2000).

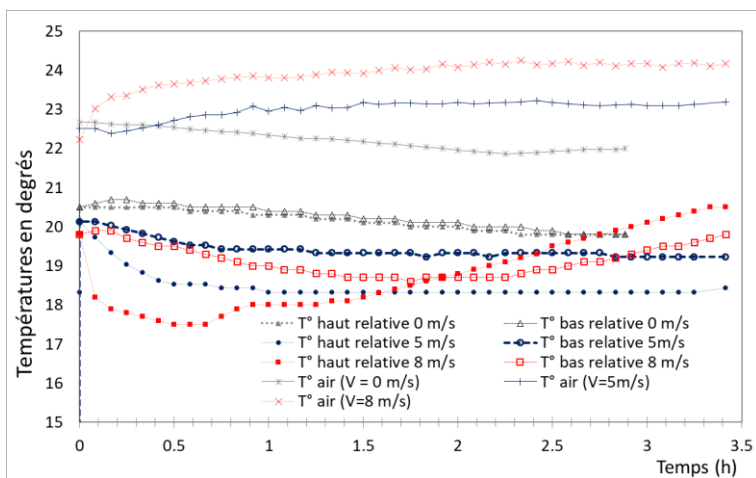


FIGURE 4. Évolution de la température au sein du béton en fonction du temps à deux niveaux de mesure et pour trois vitesses de vent de 0, 5, et 8 m/s

Pour la vitesse de vent la plus élevée, au bout de 2 heures les températures remontent de façon significative en particulier en partie supérieure du béton. En effet, le flux d'évaporation diminue considérablement (Figure 3) ce qui entraîne une diminution de la chaleur latente d'évaporation et donc une augmentation de la température du béton frais qui tend à se mettre en équilibre avec la température de l'environnement.

V. CONCLUSION

L'étude présentée dans cet article se concentre sur l'effet du vent pris égal à 0, 5, 8 m/s sur les valeurs de flux de séchage et sur les conséquences sur quelques paramètres physiques clés que sont la température et la pression capillaire du béton frais.

Sur la base des résultats précédemment présentés les conclusions suivantes sont proposées :

- Comme on pouvait s'y attendre, le flux d'évaporation des bétons augmente avec la vitesse de vent. Il est cohérent avec les calculs simplifiés théoriques pour des vitesses modérées ($V < 5$ m/s) puis diverge. Il est de l'ordre de $1,2 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ pour une vitesse de vent de 8 m/s.

A vitesse de vent nulle, le flux de séchage reste constant pendant la durée de l'expérience, à 5 m/s il diminue sensiblement au bout de quelques heures et à 8 m/s, il est quasiment divisé par 2 au bout de 1,6 h environ.

- Le vent a un effet très sensible sur l'évolution des pressions capillaires dans le béton. Il intervient sur les pentes des courbes de développement de la pression capillaire qui varient du simple au double pour une vitesse de vent de 5 à 8 m/s.

Plus le flux de séchage est fort, plus la dépression décroît rapidement. Les courbes de mesure haute et basse sont globalement parallèles mais la mesure supérieure décroît plus vite et atteint des valeurs plus faibles. Toutefois, les pressions atteintes après le premier changement de pentes des courbes restent du même ordre, de même que la valeur du gradient qui suit la même évolution pour des vents de 5 et 8 m/s. Le vent ne semblerait donc pas intervenir sur la valeur de la pression d'entrée d'air qui est un paramètre intrinsèque du matériau. En revanche le vent intervient sur le temps mis pour atteindre cette pression et par conséquent il intervient aussi très probablement sur l'âge d'apparition de la première fissure le plus faible pour un vent de 8 m/s.

- Le vent génère également un refroidissement notable du béton frais et provoque un gradient thermique entre le haut et le bas de l'échantillon. Comme d'usage en structure, le gradient thermique met en tension la partie froide. On pourrait donc penser que le phénomène de gradient thermique vienne accentuer le risque de fissuration amené par la pression d'entrée d'air dans le milieu en surface de l'échantillon.

Le séchage est donc couplé avec la variation de température, dans son ensemble et sous forme de gradient, qui n'est donc pas simplement liée aux conditions extérieures ou aux phénomènes chimiques liés à l'hydratation du béton. Ces phénomènes physiques peuvent influencer sur l'hydratation du béton et sa montée en résistance. Lorsque le béton est soumis à la dessiccation sévère, les gradients de dépression capillaire et de température tendent à créer des efforts internes dans le béton frais, que celui-ci n'est pas encore en mesure d'équilibrer, surtout si la baisse de température génère un retard d'hydratation ce qui amène des conditions très favorables à la fissuration de retrait plastique. Le besoin de cure et la durée de celle-ci pourraient en être modifiés.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les élèves de 2A Bâtiment et Energie, Rania El Hajami, Julie Kerhoas, et Solenn Lamarche pour leur participation à ce travail et pour leur implication.

REFERENCES

ACI305R-91 (1999) *ACI Manual on concrete practice part 2 'Construction practices and inspection pavements'*. American-Concrete-Institute.

Acker, P., Torrenti, J.-M. and Guérinet, M. (2008) *La maîtrise de la fissuration au jeune âge : condition de durabilité des ouvrages en béton*, in *La durabilité des bétons*. Presses des Ponts et Chaussées.

Al-Fadhala, M. and Hover, K. C. (2001) 'Rapid evaporation from freshly cast concrete and the Gulf environment', *Construction and Building Materials*, 15(1), pp. 1–7. doi: 10.1016/S0950-0618(00)00064-7.

Josserand, L. (2002) *Ressuage des bétons hydrauliques. Thèse de doctorat*. Presses des Ponts et

Chaussées.

Laplante, P. and Boulay, C. (1994) 'Evolution du coefficient de dilatation thermique du béton en fonction de sa maturité aux tous premiers âges', *Materials and Structures*, 27, pp. 596–605.

Loukili, A. *et al.* (2000) 'A new approach to determine autogenous shrinkage of mortar at an early age considering temperature history', *Cement and Concrete Research*, 30, pp. 915–922.

Marchi, T. *et al.* (2022) 'Influence of Quality of Recycled Concrete Aggregates Paste on the Internal Cure Phenomenon', in *RILEM 11eme ICCM*. doi: 10.14359/51732785.

Mbemba, E. *et al.* (2013) 'Influence of mix design parameters and drying conditions on cracking', pp. 1–15.

Ollivier, J.-P. and Torrenti, J.-M. (2008) *La structure poreuse des bétons et les propriétés de transfert, La durabilité des bétons*. Presses des Ponts et Chaussées.

Powers, T. . (1968) *Physical structure of paste, The properties of fresh concrete*. J.Wiley.

Radocea, A. (1990) 'Water pressure in fresh and young cement paste', *Nordic concrete research*, 9, pp. 145–159.

Slowik, V., Schmidt, M. and Fritzsche, R. (2008) 'Capillary pressure in fresh cement-based materials and identification of the air entry value', *Cement & Concrete Composites*, 30, pp. 557–565. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2008.03.002.

Souche, J.-C. (2015) *Etude du retrait plastique des bétons à base de granulats recyclés avec mesure de l'influence de leur degré de saturation*. In french PhD Thesis. Université de Montpellier.

Souche, J.-C. *et al.* (2017) 'Influence of recycled coarse aggregates on permeability of fresh concrete', *Cement and Concrete Composites*, pp. 1–17.

Topcu, I. B. and Elgun, V. B. (2004) 'Influence of concrete properties on bleeding and evaporation', *Cement and Concrete Research*, 34(2), pp. 275–281. doi: 10.1016/j.cemconres.2003.07.004.

Turcry, P. (2004) *Retrait et fissuration des bétons autoplaçants. Influence de la formulation*. Thèse de doctorat. Ecole Centrale de Nantes, Université de Nantes.

Turcry, P. and Loukili, A. (2006) 'evaluation of plastic shrinkage cracking of Self-Consolidating Concrete', *ACI Materials journal*, 103-M30(July-August), pp. 272–279.

Uno, P. J. (1998) 'Plastic shrinkage Cracking and Evaporation Formulas', *ACI Materials journal*, 95, pp. 365–375.

Wang, J. (2021) 'Test and simulation of concrete surface factor under different wind speeds', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 300, p. 124019. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124019.

Wei, Y., Guo, W. and Zhang, Q. (2020) 'A model for predicting evaporation from fresh concrete surface during the plastic stage', *Drying Technology*, 38(16), pp. 2231–2241. doi: 10.1080/07373937.2019.1691012.

Zuraida, R. (1989) 'Water évaporation from freshly placed concrete surfaces in hot weather', *Cement and Concrete Research*, 19, pp. 465–475.