

Indicateurs alternatifs pour mesurer la profondeur de la carbonatation

Jusqu'à présent, la profondeur de carbonatation du béton a été déterminée selon les normes internationales et nationales à l'aide de l'indicateur de pH phénolphtaléine. La phénolphtaléine étant listée parmi les produits chimiques nocifs ou préoccupants (ECHA), l'annexe I de la SIA 262/1:2019 exige des mesures particulières lors de la manipulation de cette substance et les normes EN 12390-10 et -12 recommandent la thymolphtaléine comme indicateur alternatif. Ce bulletin présente les différences entre la phénolphtaléine et deux indicateurs alternatifs (la thymolphtaléine et un nouvel indicateur mixte développé par le TFB), en fonction de leurs avantages et inconvénients respectifs.

1 Introduction

Lors la carbonatation du béton, les phases hydratées de la pâte de ciment réagissent avec le CO₂ dissous pour former du carbonate de calcium. Ainsi, le pH de la solution interstitielle diminue graduellement. En dessous d'une certaine valeur pH seuil au niveau de l'armature, celle-ci n'est plus thermodynamiquement stable et peut corroder sous certaines conditions (humidité suffisante, conductivité électrique et électrolytique et un apport suffisant en oxygène). Pour que les bétons soient durables, leur résistance à la carbonatation doit satisfaire certaines limites en fonction de la classe d'exposition. Si l'indicateur change, l'effet sur les valeurs limites définies sur la base de la phénolphtaléine devra être investigué.

2 Indicateurs de couleur



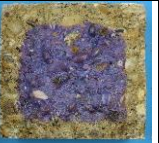
Les exigences relatives à un indicateur de pH pour la détermination de la profondeur de carbonatation sur des échantillons de béton fraîchement fendus ou dans des fenêtres de sondage (piquage) sur ouvrage sont les suivantes :

- Inoffensif pour l'environnement et la santé
- Zone de virage à environ pH 8.3-10
- Changement de couleur clairement visible
- Mesurable par analyse d'image assistée par ordinateur
- Convient à la pratique : séchage rapide et hautement visuels

Le changement de couleur et la visibilité de la zone de virage ne doivent pas être influencés par les conditions d'humidité et la composition du béton. Le tableau 1 présente les différents indicateurs choisis dans le cadre de cette étude et indique leurs avantages et inconvénients.

3 Plan d'investigation

Pour les essais comparatifs, des échantillons ont été carbonatés dans les conditions d'essai indiquées dans le tableau 2 et la profondeur de carbonatation a été déterminée.

Indicateur	Phénolphtaléine (A)	Thymolphtaléine (B)	Indicateur mixte TFB (C)
Photo			
pH de virage et couleurs	8.3 – 10 incolore à rose	8.8 – 10 incolore à bleu	8.3 - 9.7 orange à violet
Toxique	oui	non	non
Écologique	oui	oui	oui
Analyse d'images	oui	non	oui
Visibilité en cas d'humidité élevée	bonne	moyenne	bonne
Durée de séchage	courte	élevée	courte
Viscosité élevée	non	oui	oui

Tab. 1 - Indicateurs, avantages et inconvénients

Norme d'essai	Conditions de carbonatation
(1) SIA 262/1:2019	CO ₂ : 4 ± 0.1% ; HR: 57 ± 3% ; T: 20 ± 2°C
(2) SN EN 12390-10:2018	CO ₂ : ≈0.047% ; HR: ≈74% ; T: ≈12°C
(3) EN 12390-12:2020	CO ₂ : 3 ± 0.5% ; HR: 57 ± 3% ; T: 20 ± 2°C
(3a) EN 12390-12:2020 mod.	CO ₂ : 4 ± 0.1% ; HR: 57 ± 3% ; T: 20 ± 2°C
(3b) EN 12390-12:2020 mod.	CO ₂ : 1 ± 0.1% ; HR: 90 ± 3% ; T: 20 ± 2°C

Tab. 2 - Conditions d'essai

Outre les indicateurs phénolphtaléine et thymolphtaléine, un nouvel indicateur mixte à base du phénolanalogue rouge de crésol et de bleu de thymol a été développé. Le rouge de crésol n'est pas classé comme substance nocive selon la directive UE n° 1272/2008. Le pH de virage est similaire à la phénolphtaléine.

Le tableau 3 donne un aperçu des matériaux et méthodes étudiés.

Cond.	Matériau	Liant	E/C [-]	Indicateur	Méthode de mesure
(1), (2), (3), (3a)	Béton AB16	CEM I, CEM II/A-V, CEM III/B	0.5	(A), (C)	Analyse d'image, mesure manuelle
(1)	Béton AB16	divers		(A), (B)	Mesure manuelle
(2), (3a), (3b)	Mortier EN 196	CEM I 42.5R, CEM II/B-LL, CEM III/B, CEM IV (45%CV, 5% FS)	0.4, 0.5, 0.65	(A), (B)	Mesure manuelle

Tab. 3 - Matériaux et méthodes

4 Analyse et évaluation

Pour comparer les indicateurs, une des surfaces de fendage a été pulvérisée avec l'indicateur de référence (phénolphtaléine) et l'autre surface de fendage avec l'indicateur de comparaison (thymolphtaléine ou indicateur mixte). La profondeur de carbonatation a été déterminée selon le tableau 2. Outre la mesure manuelle, la mesure de la profondeur a également été effectuée à l'aide d'une analyse d'image assistée par ordinateur (voir tableau 3).

Malgré le fait que la profondeur de carbonatation ait été mesurée sur les mêmes échantillons, par le même technicien, au même moment et avec la même méthode, les points de mesure ne se trouvaient pas nécessairement aux mêmes endroits. Pour cette raison, les écarts-types de répétabilité et de reproductibilité des normes sont utilisés pour évaluer la qualité des indicateurs alternatifs (voir le tableau 4).

Tab. 4 - Données de précision

Norme d'essai	Écart-type de répétabilité, S_r	Écart-type de reproductibilité, S_R
(1) SIA 262/1:2019 *	0,15 - 0,70 mm	0,3 - 1,8 mm
(2) SN EN 12390-10:2018	0,29 mm	0,71 mm
(3) EN 12390-12:2020 **	0,56 - 0,9 mm	0,86 - 2,30 mm

* A partir des coefficients de carbonatation recalculés aux profondeurs mesurées

** A partir de CEN/TR 17172, Programme de validation des méthodes d'essai normalisées de pénétration du chlorure et de carbonatation

L'évaluation a été effectuée selon la norme ISO 6879 par la détermination de l'écart-type de reproductibilité selon l'équation (1).

$$S_R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_j)^2}{2n}} \quad \text{Eq. (1)}$$

x_i est la valeur de référence (phénolphtaléine) en mm

x_j est la valeur de comparaison (indicateur de comparaison) en mm

n est le nombre de valeurs mesurées

5 Résultats

Les écarts-types de reproductibilité des deux indicateurs sont résumés dans le tableau 5.

Essai	(1)	(2)	(3)	(3a)	(3b)	Corrélation
Thymolphtaléine	0.50	0.13	-	-	0.20	1.06
Indicateur mixte TFB, mesure manuelle	0.44	0.20	0.81	0.41	-	1.00
Indicateur mixte TFB, mesure photo	0.47	-	0.71	0.38	-	1.03

Tab. 5 - Écart-type de reproductibilité et écart moyen par rapport à la profondeur mesurée avec la phénolphtaléine (corrélations)

Les figures 1a à c comparent les résultats. La valeur de référence sur l'axe x est la profondeur mesurée avec la phénolphtaléine.

6 Résumé

Cette étude a permis de constater que l'indicateur mixte présente la meilleure corrélation avec la phénolphtaléine pour toutes les conditions d'essai. L'indicateur mixte indique une profondeur de carbonatation en moyenne 1,01 fois plus faible que l'indicateur phénolphtaléine.

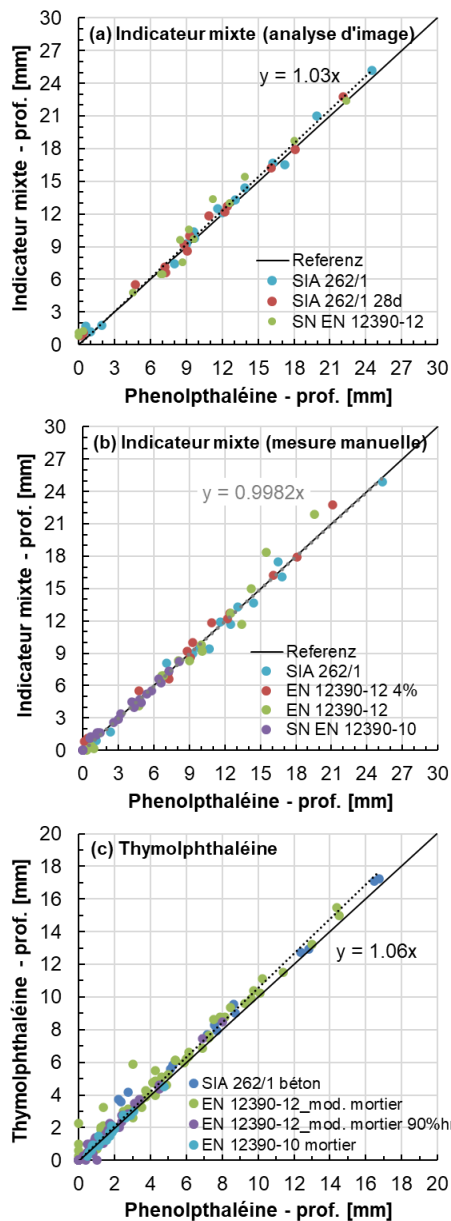


Fig. 1 - Comparaison des profondeurs de carbonatation mesurées

(a) Indicateur mixte avec analyse d'image

(b) Indicateur mixte avec mesure manuelle

(c) Thymolphtaléine avec mesure manuelle

Tandis que l'indicateur thymolphtaléine montre une profondeur de carbonatation en moyenne 1,06 fois plus faible que l'indicateur phénolphtaléine.

L'écart-type de reproductibilité (cf. tableau 5) se situait en principe dans la fourchette de l'écart-type de répétabilité pour chaque essai.

Dans des conditions d'humidité élevée (sur ouvrage ou lors d'essais selon EN 12390-10), les deux indicateurs alternatifs présentent le changement de couleur le plus net à cause de leurs viscosité et vitesse de séchage supérieures, tandis que dans des conditions d'essai de laboratoire (57% d'humidité relative), les indicateurs phénolphtaléine et l'indicateur mixte présentent le changement de couleur le plus net.

L'analyse d'image assistée par ordinateur n'a été réalisable qu'avec l'indicateur phénolphtaléine et l'indicateur mixte.

Actuellement, seuls l'indicateur mixte et l'indicateur thymolphtaléine sont jugés inoffensifs pour l'environnement et la santé.

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du travail de master de Mario Ruh au TFB AG.

Megane Boscardin
Pascal Kronenberg