

Sur la mesure de distances inter-bulles dans R^2 par analyse d'images

RÉSUMÉ

La résistance au gel des bétons dépend de l'espacement des vides en son sein. Le projet de norme AFNOR NF P 18-320 propose une méthode de préparation de sections de béton pour mettre en évidence les bulles d'air. Les techniques vidéo-informatiques d'analyse d'images permettent par ailleurs de calculer automatiquement différentes grandeurs qui renseignent sur l'état de proximité d'objets à l'intérieur d'un champ d'observation.

Basé sur des transformations morphologiques des images, cet article propose trois types de calcul de distances moyennes inter-bulles dans l'espace bidimensionnel défini par la trame discrète de l'analyseur d'images :

- > Le premier consiste à mesurer la distance de n'importe quel point de la matrice de béton aux bulles d'air les plus proches.
- > Le second rend globalement compte des plus longs trajets à parcourir du cœur de la phase solide du béton aux bulles d'air environnantes.
- > Le troisième effectue la mesure de la plus petite distance séparant une bulle d'air de sa plus proche voisine.

Cet article présente également brièvement les possibilités d'automatisation offertes par l'analyse d'images pour mesurer un taux surfacique de bulles d'air, pour dénombrer ces bulles et pour rechercher leur répartition dimensionnelle.

Définitions

R^2 : espace bidimensionnel,
 R^3 : espace tridimensionnel.

MOTS CLÉS : *Résistance au gel - Bulles d'air - Trajet de l'eau - Analyse d'images - Transformations morphologiques - Voisinage - Distance moyenne inter-bulles - Taux surfacique de bulles - Dénombrement des bulles - Répartition dimensionnelle des bulles d'air.*

Carl REDON
Doctorant

Laboratoire d'Études et de Recherches
sur les Matériaux (LERMAT)

Laboratoire d'Études et de Recherches sur les Matériaux
de Construction de Caen (ESITC Caen, groupe ESTP)

Lilliane CHERMANT
Ingénieur CNRS

Michel COSTER
Professeur à l'Université de Caen

Jean-Louis CHERMANT
Directeur de Recherche CNRS

Laboratoire d'Études et de Recherches
sur les Matériaux (LERMAT)

Jean-Louis QUENEC'H
Docteur

Laboratoire d'Études et de Recherches
sur les Matériaux (LERMAT)

Laboratoire d'Études et de Recherches sur les Matériaux
de Construction de Caen (ESITC Caen, groupe ESTP)

Introduction

La résistance au gel des bétons est fortement dépendante de l'espacement des bulles d'air de la pâte de ciment durcie. Parmi les différentes techniques possibles, l'analyse d'images peut s'avérer être un outil intéressant dans la mesure où, par le biais de transformations morphologiques de l'image, elle permet de déterminer automatiquement différents types de distances inter-bulles dans l'espace bidimensionnel défini par la trame discrète de l'analyseur d'images.

Sont présentées ici :

- > une fonction de densité de voisinage indiquant un pourcentage de béton situé à une distance donnée des bulles,
- > une mesure de distance qui prend en compte non seulement les demi-distances entre bulles d'air, mais également les distances des bulles aux points situés au cœur des plages de béton inscrites entre les vides,
- > la mesure de la plus petite distance séparant une bulle de sa plus proche voisine.

Par ailleurs l'analyse d'images renseigne sur le taux surfacique global de bulles, permet de mesurer le nombre de bulles par unité de surface et donne accès à la répartition dimensionnelle de ces vides.

Résistance au gel des bétons

Le gel peut provoquer un écaillage des surfaces en béton qui retiennent l'humidité, au point de dénuder les armatures métalliques. Les structures en béton, y compris celles en service depuis plusieurs années, contiennent une part d'eau libre n'ayant pas participé à la réaction d'hydratation du ciment et pouvant migrer au travers du réseau de pores capillaires. Plus la température extérieure chute rapidement en-dessous de 0 °C, moins cette eau atteint aisément les fronts de gel internes les plus proches que constituent les bulles d'air. Mais ce ne sont pas tant les dilatations survenant lors de la transformation de l'eau de l'état liquide à solide, que les pressions engendrées par le flux d'eau dans les capillaires qui sont dommageables pour le béton.

La loi de Darcy [1], décrivant l'aptitude d'un corps, de section A, à se laisser traverser par un fluide, de viscosité dynamique μ , indique de fait que la pression d'eau, P, au cœur du béton sera d'autant plus grande que le débit, Q, est fort, que la perméabilité, définie par le coefficient k, est faible et que la longueur du trajet correspondant au cheminement du liquide, dZ, est importante.

$$Q = k \frac{A}{\mu} \frac{dP}{dZ}$$

La longueur du trajet, ainsi nommée, correspond à la distance moyenne entre n'importe quel point de la phase solide du béton et le front de congélation le plus proche [2].

Il est parfois nécessaire d'avoir recours à l'emploi d'adjuvants entraîneurs d'air qui permettent de répartir uniformément un grand nombre de bulles d'air de petite taille, de l'ordre de la dizaine de microns, qui fragmente le trajet de l'eau, constituant par ailleurs autant de vases d'expansion où la glace se forme librement. Pour autant que chaque vide d'air entraîné joue pleinement son rôle, la longueur du trajet devrait être égale à la demi-distance calculée dans R^3 entre deux bulles d'air voisines. Elle est alors notée \bar{L} , [3]. Pour une catégorie de béton donnée, on parvient à définir une demi-distance critique, \bar{L}_{crit} , en-deçà de laquelle l'état de proximité des bulles d'air garantit une bonne tenue au gel. Plus \bar{L}_{crit} est élevée, meilleure est la résistance au gel ; mais les auteurs [4] situent généralement cette valeur aux alentours de 200 μ m pour les bétons

d'emploi courant. On a donc jusqu'alors défini deux sortes de distances inter-bulles : soit comme une distance d'un point quelconque de la matrice de béton au vide le plus proche, soit comme le plus petit parcours entre deux bulles.

Principes de base en analyse d'images

Pour analyser la répartition spatiale de la porosité par analyse d'images, on est obligé de travailler sur des sections planes du matériau. À condition de réaliser suffisamment de coupes sériées, les informations que nous obtenons dans le plan ne permettraient d'accéder aisément à une description de la structure poreuse dans R^3 que dans le cas où celle-ci serait isotrope. Si cette condition est globalement vérifiée pour des bétons ordinaires, en revanche les bétons de fibres renferment souvent des pores aplatis. Ainsi, quelque soit le type de béton étudié, nous limitons ici notre description à l'espace R^2 .

Pour réaliser ces analyses de manière automatique nous devons former des images numériques à l'aide d'un système d'acquisition par l'intermédiaire d'une caméra CCD, noir et blanc, connectée à une carte d'acquisition, Matrox, elle même reliée à un analyseur automatique d'images, basé sur le logiciel Visilog.

Les images obtenues correspondent à des champs d'observation de $X \times X$ mm² et sont visualisées sur une trame de 512*512 pixels. Les niveaux de gris des images varient entre 0 (noir) et 255 (blanc).

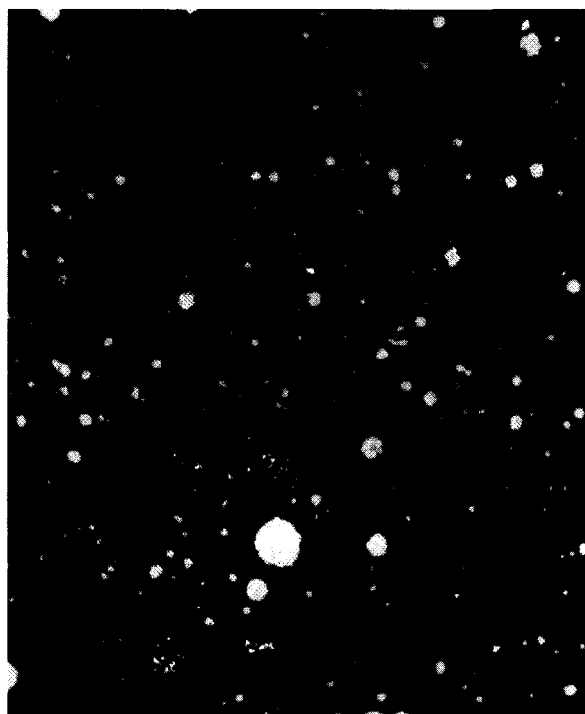


Fig. 1 - Aspect d'un échantillon de béton préparé pour l'acquisition d'image.

De telles images doivent d'abord être traitées avant d'effectuer des mesures. Normalement, la première étape consiste à filtrer l'image en niveaux de gris (fig. 1). Dans notre cas, le contraste entre les vides et le béton est suffisant et un simple seuillage nous donnera une image binaire. La phase à analyser sera traduite par du blanc et le complémentaire apparaîtra en noir.

Cependant, à l'issue de l'acquisition, il y a du bruit résiduel sur l'image et apparaissent quelques défauts qui résultent de la préparation des échantillons. En morphologie mathématique, les deux opérations de base sont l'érosion et la dilatation [5] et [6]. À partir de ces deux transformations morphologiques on peut réaliser une reconstruction de l'image (fig. 2). Cela constitue un filtrage ; de la sorte, les petits artefacts présents sur l'image binaire initiale ne figurent plus sur l'image binaire reconstruite.

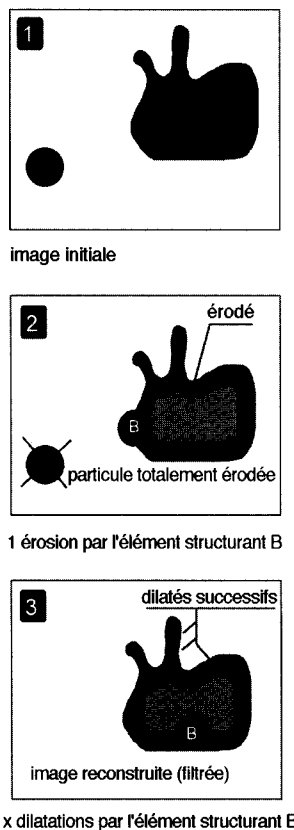


Fig. 2 - Filtrage par érosion de taille 1 suivie d'une reconstruction, par l'élément structurant B.

Nous allons proposer maintenant trois méthodes d'analyse de la répartition spatiale des vides qui font appel à deux opérateurs morphologiques différents. Les deux premières utilisent la notion de fonction distance appliquée à l'ensemble de l'image, alors que la dernière s'effectue sur la base d'une analyse dite individuelle. Chacune de ces méthodes met en évidence un aspect particulier du matériau.

Notons que les distances qui vont être calculées par le biais de l'informatique n'auront de sens

que dans l'espace bidimensionnel défini par la trame discrète de l'analyseur d'images. Ce ne sont donc pas des distances euclidiennes mesurées dans un espace continu.

La fonction distance

Considérons un ensemble X , ici les vides, et son complémentaire, X^c , ici la phase solide du béton. L'état de dispersion des vides peut être caractérisé à partir de la fonction distance, $\epsilon(x)$, dans X^c . Elle est définie de la manière suivante :

$$\epsilon(x) = d(x, X) = \inf [d(x, y) : y \in X]$$

avec $x \in X^c$

D'un point de vue pratique, l'image des distances va être telle qu'à chaque pixel on associe sa distance exprimée en niveaux de gris. Cette image est ici obtenue par érosions successives de taille 1 pixel de X^c (fig. 3).

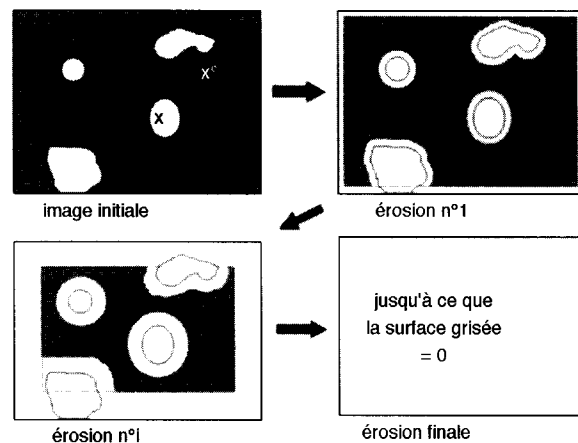


Fig. 3 - Illustration de la construction de la fonction distance.

La densité de voisinage (distance = r)

À partir de cette image des distances, on peut établir l'histogramme qui définit la probabilité de trouver un point de X^c à une distance, r , donnée de l'ensemble X . C'est ce que nous appelons la fonction densité de voisinage. En se reportant à la figure 3, soient :

r : l'incrément de l'érosion (i.e. taille d'1 pixel),

E^r : l'érosion de rang r ,

X : l'ensemble des objets,

X^c : le complémentaire de l'ensemble des objets,

Z : le masque de mesures (cf. mesure de p),

$A[E^r(X^c) \cap E^r(Z)]$: l'aire grisée,

$A[(X^c) \cap E^r(Z)]$: l'aire encadrée en pointillé.

À chaque itération (fig. 3), on calcule la valeur de la fonction de distribution de voisinage [6], $\text{Dist}(r)$:

$$\text{Distr}(r) = 1 - \frac{A[E^r(X^c) \cap E^r(Z)]}{A[(X^c) \cap E^r(Z)]}$$

La fonction densité de voisinage n'est autre que la dérivée de la fonction de distribution par rapport à r .

La distance moyenne, \bar{r} , délivrée par cette fonction correspond donc à la distance moyenne entre n'importe quel point de la phase solide et les vides.

Recherche des maxima (distance = d)

Si l'on imagine une superposition des érodés successifs de X^c , l'image des distances peut être assimilée à un relief dans lequel il existe des maxima locaux, ils correspondent à des pixels entourés de valeur inférieures ou égales : sommets et cols, et des minima, les lacs, tous à l'altitude 0 et matérialisant les vides. Rechercher la distribution des altitudes des maxima, c'est rechercher les distances des vides aux sommets, points situés au centre des plages de béton inscrites entre les vides, et les distances des vides aux cols, soient des demi-distances entre vides. Contrairement à \bar{r} , la distance moyenne \bar{d} est donc calculée à partir de points précis de X^c . De la sorte, \bar{d} rend globalement compte des plus longs trajets à parcourir du cœur de la phase solide du béton aux vides environnants. \bar{d} caractérise ainsi la largeur moyenne de la phase solide.

Calcul de la plus petite distance entre un objet et son plus proche voisin (distance = p)

Pour avoir la plus petite distance entre vides, on doit abandonner les opérateurs globaux et faire de l'analyse individuelle, c'est-à-dire sélectionner un vide et rechercher le vide voisin le plus proche.

Généralement, les champs d'observation ne fournissent que l'image d'une portion de la surface que l'on regarde. L'analyse des images est alors dite locale. Comme l'on souhaite mesurer la distance séparant un objet de son plus proche voisin, rien ne garantit que ce dernier soit inclus, tout ou partie, dans le champ d'observation. Pour minimiser le biais qui en résulte, on construit un masque de mesures réduit inclus dans l'image. Ses dimensions sont déterminées à partir d'une érosion des frontières du champ d'observation.

Ici, nous avons choisi de faire correspondre la taille de l'érosion au plus grand diamètre des objets des images analysées.

À partir de l'image initiale, on bâtit l'image des centres géodésiques des objets. Les distances au plus proche voisin seront mesurées à partir des seuls objets dont le centre géodésique est inclus dans le masque réduit. Pour ce faire, ces objets sont individualisés, puis subissent un à un des dilations de taille 1 pixel jusqu'à rencontrer le plus proche voisin (fig. 4). Le nombre de dilations correspond à la plus petite distance recherchée.

Dans le cas présent, même si un objet est équidistant de deux voisins, nous n'avons répertorié qu'une fois la distance. \bar{p} , correspond à la somme des distances rapportée aux nombres d'objets dont le centre géodésique est inclus dans le masque de mesures réduit : c'est, la moyenne des plus petites distances séparant les objets de leurs plus proches voisins.

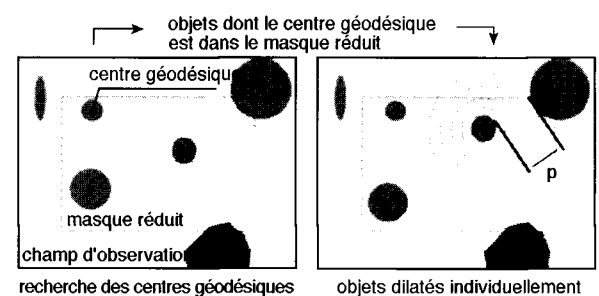


Fig. 4 - Illustration de l'algorithme de calcul de p .

Distances calculées et mesurées sur trois images test

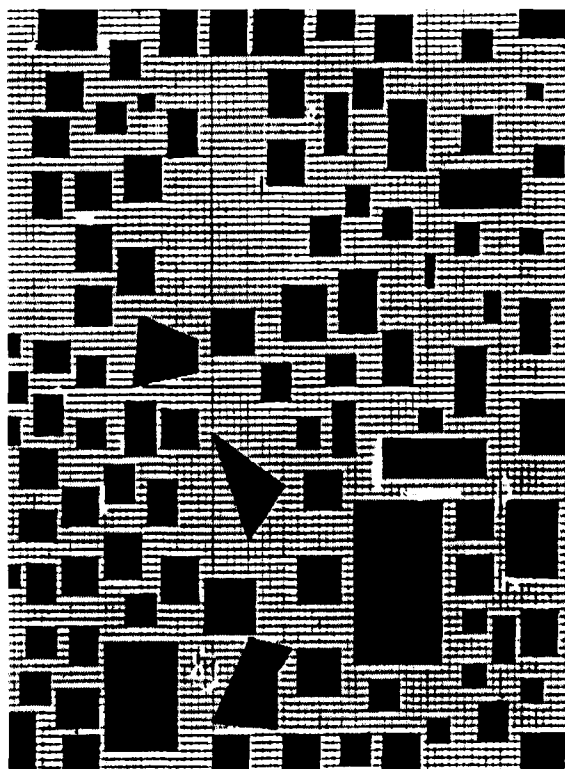
Nous avons dessiné manuellement trois images (fig 5a, b, c) test sur du papier millimétré. Leur surface est de $80 \times 100 \text{ mm}^2$, représentée sur une trame de 512×512 pixels. Un pixel définit donc une longueur moyenne de 0,176 mm.

Le tableau I permet de comparer les distances moyennes délivrées par les trois algorithmes à la seule distance que l'on peut mesurer manuellement : p .

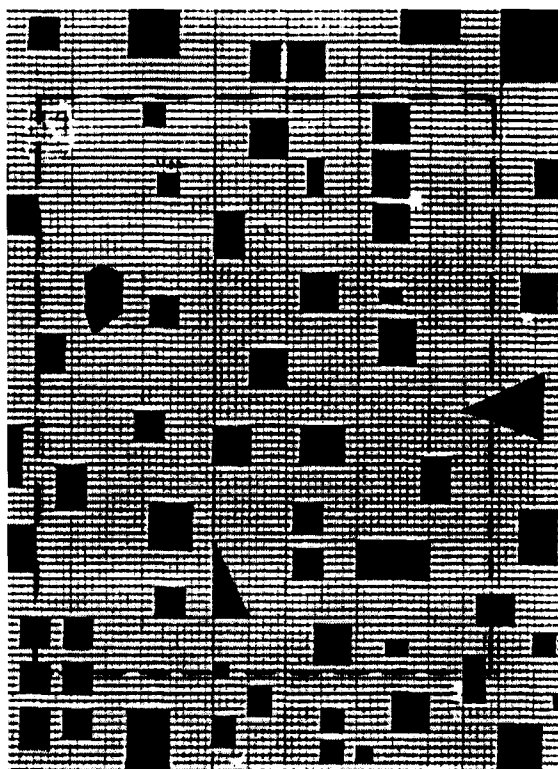
Notons qu'il serait illusoire de calculer les écarts-types associés à chacune de ces distances moyennes, étant donné qu'elles ne se rapportent chacune qu'à l'analyse d'une seule image.

La distance \bar{r} est minimale pour l'image Test 1, ce qui signifie que c'est dans cette image que le pourcentage moyen de matrice est le plus proche des objets. Autrement dit, c'est dans Test 1 qu'en moyenne la distance de n'importe quel point de la matrice aux objets est la plus faible : où que l'on soit dans la matrice il y a un objet très proche.

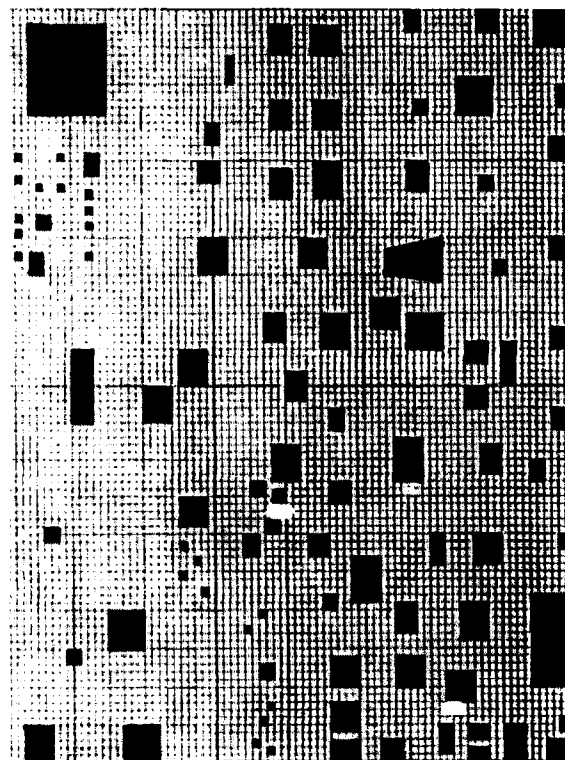
Fig. 5 (échelle 2/1)



a. Image TEST 1.



c. Image TEST 3
(pointillé : masque réduit pour la mesure de p).



b. Image TEST 2.

TABLEAU I
Distances moyennes pour les images Test
(valeurs de \bar{r} , \bar{d} , \bar{p} , exprimées en mm)

Image n°	Test 1	Test 2	Test 3
\bar{r}	1,61	2,36	2,63
\bar{d}	1,27	2,24	2,55
Nombre d'objets pris en compte pour calculer \bar{p}	61	54	31
\bar{p}	1,31	2,70	3,39
\bar{p} mes. (mesurée)	1,47	2,81	3,79
% écart (\bar{p}/\bar{p} mes.)	10,7 %	3,9 %	10,6 %

La distance \bar{d} est minimale pour l'image Test 1, ce qui signifie que c'est dans cette image qu'en moyenne la distance des objets aux extrema est la plus faible. Autrement dit, c'est dans Test 1 qu'en moyenne la distance des objets aux points centraux de la matrice et aux points à mi-parcours entre deux objets est la plus faible.

La distance \bar{p} est minimale pour l'image Test 1, ce qui signifie qu'en moyenne c'est dans cette image que la plus petite distance d'un objet à son plus proche voisin est la plus faible.

Les trois types de moyenne sont concordantes : elles indiquent toutes, en délivrant des informations différentes et complémentaires, que les objets sont les plus rapprochés sur l'image Test 1 et les plus éloignés sur l'image Test 3.

Par ailleurs, bien que la métrique utilisée sur la trame discrète de l'analyseur soit différente de la métrique euclidienne sur le papier millimétré, nous estimons satisfaisante la corrélation entre les valeurs mesurées et calculées de \bar{p} puisque leurs différences n'excèdent pas 10 % en moyenne. De fait, la validité de cette comparaison, somme toute valable puisque les plus petites distances à mesurer sont alignées suivant les directions principales de la trame de l'analyseur, dépend fortement de la précision du tracé manuel des objets sur la feuille millimétrée. Or systématiquement, la distance \bar{p} mesurée est supérieure à la distance \bar{p} calculée. Cela semble logique puisque, au vu des images, le tracé manuel a pu déborder l'épaisseur du trait de quadrillage, phénomène que l'on ne sait pas prendre en compte lors de la mesure manuelle !

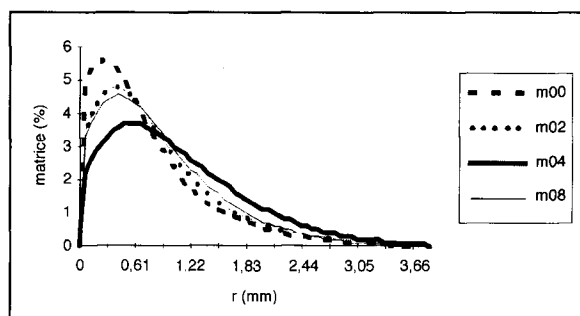
Quelques mesures de distances inter-vides sur des sections de béton

Dans une étude antérieure [7], nous avons quantifié par analyse d'images l'évolution de la macro-porosité de bétons qui recevaient des doses croissantes de fluidifiant. Des plaques de 14*14 cm² ont été découpées dans la partie médiane de prismes de béton qui avaient été coulés pour chaque composition. Neuf échantillons, de 4*4 cm², ont été taillés au cœur de chaque plaque de manière à observer une répartition des vides représentative de la composition du matériau, tandis qu'elle est représentative de la mise en forme du matériau sur ses bords. Les faces des échantillons ont été polies sous eau à l'aide de grilles diamantées. Le remplissage des vides à l'aide d'une pâte blanche a procuré un contraste fort avec la fraction solide du béton préalablement noircie [8] et [9]. Cette opération facilite le seuillage des images qui correspondent à des champs d'observation de 3,35*2,90 cm², représentées sur une trame de 512*512 pixels. Un pixel correspond à une distance de 0,061 mm.

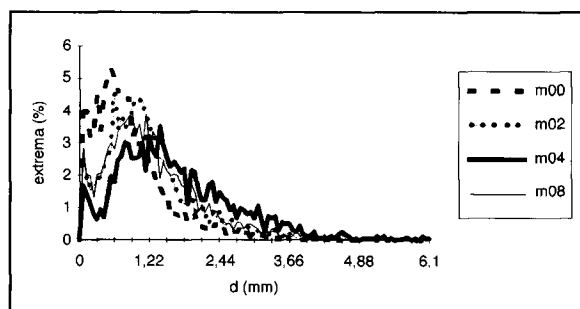
Afin d'éliminer les artefacts présents sur l'image, nous avons utilisé un filtrage de l'image binaire faisant appel à une transformation morphologique, dite érosion de taille 1, suivie d'une reconstruction (fig. 2), de la phase X des vides (inversement, sur la figure 3, c'était X^c qui était érodé). Nous n'avons conservé que les vides dont la largeur est supérieure ou égale à 3 pixels.

En fonction de la taille des échantillons et du grossissement de la caméra, nous avons donc choisi de limiter l'illustration des algorithmes à la détermination des distances entre les vides dont le diamètre équivalent est supérieur à 206 μ m et ce pour quatre compositions de béton ordinaire : contenant 0, 0,2, 0,4 et 0,8 % d'extrait sec de fluidifiant rapporté au poids de ciment. Ces bétons seront respectivement nommés m00, m02, m04 et m08.

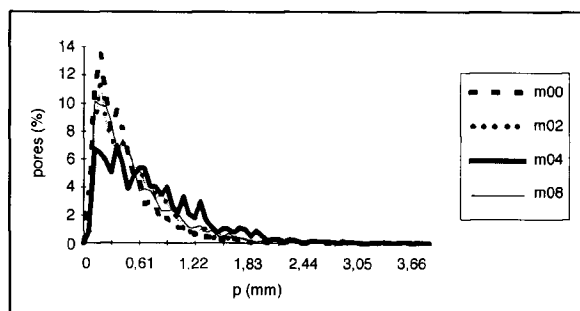
Fig. 6



a. Répartition des distances r .



b. Répartition des distances d .



c. Répartition des distances p .

Les graphes de ces fonctions ont été établis (fig. 6a, b, c), à partir de l'analyse de 27 échantillons pour chacun des quatre bétons. Les trois valeurs de distances moyennes inter-vides correspondantes sont reportées dans le tableau II.

TABLEAU II
Distances moyennes pour les bétons
(valeurs de \bar{r} , \bar{d} , \bar{p} , exprimées en mm)

Béton n°	m00	m02	m04	m08
\bar{r}	0,75	0,86	1,07	0,87
Écart-type	0,63	0,68	0,74	0,64
\bar{d}	0,89	1,22	1,66	1,26
Écart-type	0,70	0,84	1,02	0,84
Nombre de distances pour le calcul de \bar{d}	3661	3229	2139	3232
\bar{d}	0,44	0,54	0,73	0,54
Écart-type	0,34	0,39	0,52	0,41

Analyse des résultats

Les résultats du tableau II indiquent que les trois distances inter-vides sont les plus faibles dans le béton m00, celles du béton m02 sont légèrement inférieures à celles du béton m08, et c'est pour le béton m04 que l'on relève les distances \bar{r} , \bar{d} , \bar{p} , maximales.

À la lecture du tableau III qui établit le parallèle entre ces résultats et ceux obtenus lors d'une étude précédente [7], c'est en effet le béton m04 qui présentait la résistance à la compression, mesurée à 28 jours, f_{c28} , la plus élevée, le taux surfacique de vides, A_A , le plus faible, et le plus petit nombre de vides par cm^2 , N_A , relativement aux vides de taille supérieure à 206 μm .

TABLEAU III
Distances moyennes pour les bétons
(f_{c28} , A_A , N_A)

Béton n°	m00	m02	m04	m08
f_{c28} (MPa)	37	42,5	48	47,5
A_A (%)	11	6	5	6
N_A (vides/ cm^2)	24	20	13	20
(Les valeurs numériques de A_A et N_A sont obtenues par analyse d'images, cf. paragraphe suivant).				

Les distances \bar{r} , \bar{d} , \bar{p} , sont en revanche minimales pour le béton m00 qui, à l'inverse, présente la plus faible valeur de f_{c28} et les valeurs de A_A et N_A les plus élevées.

Si l'on considère que la résistance à la compression est également gouvernée par la distance

inter-vides, alors il semble logique d'observer pour le béton m08 des valeurs de \bar{r} et \bar{d} légèrement supérieures à celles du béton m02.

Pour l'analyse effectuée ici, les distances moyennes inter-vides, \bar{r} , \bar{d} , \bar{p} , peuvent être considérées comme des indicateurs de compacité du béton, le plus compact étant le m04. Si l'on avait détecté des bulles jusqu'à des diamètres minimaux de 40 μm , comme le projet de norme AFNOR NF P 18-320 [8] le préconise, ces distances auraient caractérisé de trois manières différentes la résistance au gel des bétons étudiés.

L'analyse des écarts-types révèle, d'une manière générale, d'importantes dispersions des distances mesurées, comme l'allure étalée des graphes le laissait supposer. Néanmoins, la répartition spatiale des vides est certainement la plus uniforme dans le béton m00, où l'écart-type est le plus faible, et la plus hétérogène dans le béton m04.

Il convient toutefois de noter que la technique de préparation des échantillons doit être affinée si l'on souhaite observer des bulles dont le diamètre moyen est inférieur à 200 μm . À l'issue du polissage, on observe d'autant plus d'arrachements que la cohésion du béton est faible et que les échantillons sont de grande taille. Une méthode alternative consisterait par exemple à enrober les échantillons avec une résine fluorescente pour observer sous lumière UV les bulles d'air entraîné, dont le diamètre est de l'ordre de la dizaine de microns sans risquer d'endommager les sections lors du polissage. Cette préparation serait toutefois longue et fastidieuse si l'on souhaitait analyser des séries statistiques !

Autres mesures réalisables par analyse d'images

L'analyse d'images peut être utilisée pour réaliser automatiquement d'autres types de mesures :

➤ la mesure de la teneur surfacique de vides, A_A : c'est le rapport du nombre de pixels représentant les vides sur une image binaire au nombre total de pixels de la trame. Il faut cependant prendre garde à ne pas confondre taux surfacique et fraction volumique. En effet, à moins d'analyser un grand nombre de coupes sériées d'un volume de béton, on ne peut pas déduire directement une grandeur dans R^3 à partir d'une simple mesure dans R^2 . Une telle assimilation serait d'autant plus incorrecte que la forme des vides s'éloigne de la sphère ; c'est en particulier le cas dans des bétons de fibres de mauvaise maniabilité !

➤ le nombre de vides par cm^2 , N_A : cette grandeur est déterminée par exemple en individualisant chaque vide d'une image. Quant au rapport

(A_A/N_A), à la condition que la répartition dimensionnelle des vides ne soit pas trop dispersée, il indique une taille moyenne de vides exprimée en surface moyenne.

> la répartition dimensionnelle des vides : cela nécessite d'individualiser chaque vide et de compter le nombre de pixels constituant sa surface. On établit ensuite des fuseaux dimensionnels pour dénombrer les vides d'une taille donnée. Cette méthode automatique peut constituer une alternative à la procédure du projet de norme AFNOR NF P 18-320 [8].

Conclusion

La notion de longueur moyenne de trajet de l'eau de la portion solide du béton vers les bulles les plus proches peut être envisagée de diverses manières suivant que l'on considère divers points de départ du trajet. Dans le cas de bétons

ordinaires, elle correspond sans nul doute à la distance entre n'importe quel point de la matrice de béton et les bulles d'air, auquel cas on choisira de calculer \bar{r} . Si par contre le béton a reçu un adjuvant entraîneur d'air, la répartition spatiale des bulles étant relativement homogène et les bulles bien plus rapprochées - i.e. 200 μm - que dans un béton ordinaire, les bulles doivent drainer l'eau bien plus rapidement. On pense alors pouvoir approcher la longueur du trajet de l'eau de la valeur \bar{p} . Quant à la grandeur \bar{d} , elle renseigne sur l'éloignement des points les plus distants des bulles d'air.

Bien qu'elle nécessite une préparation des échantillons toujours aussi soignée, l'analyse automatique d'images offre l'avantage de s'affranchir d'une mesure manuelle des distances ou des tailles de bulles et doit permettre de calculer des moyennes sur des séries statistiques plus étendues.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] PERRATON D., CARLES-GIBERGUES A., AÏTCIN P.-C., (1992), La perméabilité vue par le chercheur, *Les bétons à hautes performances*, édité par Y. MALIER, Presses de l'École nationale des Ponts et Chaussées, pp. 289-310.
- [2] ATILH. (1989), *Le béton exposé aux agressions hivernales*, Documentation technique, 32 pages.
- [3] KENNETH C. HOVER, (1994), Air content and unit weight of hardened concrete, *Significance of Tests and Properties of Concrete Making Materials*, Paul KIEGER and Joseph F. LAMOND editors, ASTM STP 169C.
- [4] GAGNE R., AÏTCIN P.-C., PIGEON M., (1992), La résistance au gel des bétons à hautes performances, *Les bétons à hautes performances*, édité par Y. MALIER, Presses de l'École nationale des Ponts et Chaussées, pp. 335-346.
- [5] SERRA J., (1982), *Image Analysis and Mathematical Morphology*, Academic Press.
- [6] COSTER M., CHERMANT L., (1989), *Précis d'Analyse d'Images*, 2^e édition, Presses du CNRS, pp. 65-88, 244-245.
- [7] REDON C., QUENEC'H J.L., CHERMANT L., CHERMANT J.L., (1996), Influence of superplasticizer and metallic glass ribbons on the macroporosity and the compressive strength in concrete, 9^e ICS, Copenhagen, *Acta Stereologica*, 16, sous presse.
- [8] AFNOR NF P 18-320, ou prEN 480-11, (1993), Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis - Méthodes d'essais - partie 11 : Détermination des caractéristiques des vides d'air dans le béton durci, projet de norme.
- [9] CHATTERJI S., GUDMUNDSSON H. (1977), Characterization of entrained air bubble systems in concretes by means of an image analysing microscope, *Cement and Concrete Research*, 7, pp. 423-428.

ABSTRACT

The use of image analysis to measure distances between air bubbles in two-dimensional space

C. REDON - L. CHERMANT - M. COSTER - J.-L. CHERMANT - J.-L. QUENEC'H

The ability of concrete to withstand freezing depends on the spacing of the voids within it. The AFNOR draft standard NF P 18-320 proposes a method for preparing sections of concrete in order to reveal the air bubbles. In addition, computerized image analysis techniques provide a means of calculating automatically a variety of parameters which describe the distances between objects within a field of observation. On the basis of morphological image transformations, this paper proposes three ways of calculating mean inter-bubble distances in the two-dimensional space defined by the grid of the image analyzer:

- The first is to measure the distance from any point in the concrete matrix to the nearest bubbles.
- The second is a general measurement of the greatest distances from the core of the solid phase to surrounding air bubbles.
- The third measures the smallest distance between an air bubble and its nearest neighbour.

This paper also briefly describes the potential for automation provided by image analysis in order to measure the ratio between the surface area of air bubbles and the volume, in order to count the bubbles and also to discover their dimensional distribution.