

353

45

Liège, Septembre 1930.

PREMIER CONGRÈS INTERNATIONAL DU BÉTON ET DU BÉTON ARMÉ
FIRST INTERNATIONAL CONGRESS FOR CONCRETE AND REINFORCED CONCRETE
ERSTER INTERNATIONALER KONGRESS FÜR BETON UND EISENBETON

La rétrogradation des bétons poreux

PAR

GIULIO NATTA, DR. ING. PROF.
PROFESSEUR DE CHIMIE ANALYTIQUE
A L'ÉCOLE ROYALE POLYTECHNIQUE DE MILAN

CARLO GUIDO FONTANA, DR. ING.,
INGÉNIEUR-CHEF DE SECTION
DE LA PROVINCE DE MILAN

ATTACHÉS AUX

LABORATOIRE DE CHIMIE GÉNÉRALE ET LABORATOIRE POUR LES ESSAIS DES MATÉRIAUX
DE CONSTRUCTION DE L'ÉCOLE ROYALE POLYTECHNIQUE DE MILAN.

Editions " LA TECHNIQUE DES TRAVAUX ,"
196, Rue Grétry
LIEGE

La rétrogradation des bétons poreux

PAR

GIULIO NATTA, DR. ING. PROF.
PROFESSEUR DE CHIMIE ANALYTIQUE
A L'ECOLE ROYALE POLYTECHNIQUE DE MILAN

CARLO GUIDO FONTANA, DR. ING.,
INGÉNIEUR-CHEF DE SECTION
DE LA PROVINCE DE MILAN

ATTACHÉS AUX

LABORATOIRE DE CHIMIE GÉNÉRALE ET LABORATOIRE POUR LES ESSAIS DES MATÉRIAUX
DE CONSTRUCTION DE L'ECOLE ROYALE POLYTECHNIQUE DE MILAN.

UN des problèmes les plus importants de la résistance des matériaux de construction est celui de l'influence du temps sur les propriétés mécaniques des matériaux employés.

Il est très important d'examiner l'action sur le béton des agents atmosphériques tels que l'acide carbonique, l'eau et l'oxygène; leur action détériorante se développe plus ou moins rapidement sur presque tous les matériaux de construction.

Quoique ils n'aient pas dans les conditions normales une action nuisible immédiate sur les bétons, le problème de leurs effets dans le temps se présente également, surtout dans les cas où, par suite de conditions particulières, ces agents atmosphériques peuvent agir avec une rapidité exceptionnelle.

Ce phénomène s'est présenté à nous en examinant comment s'étaient comportées quelques importantes constructions en béton armé qui, construites et réceptionnées à charges prévues, ont montré, après deux années seulement, les premières manifestations d'une altération qui a obligé le constructeur à refaire les structures détériorées. Nous nous référons dans cette note à nos observations sur des bétons détériorés, sur d'autres en cours d'altération et sur nos recher-

ches, effectuées surtout au point de vue chimique et physique, qui nous ont permis d'établir les causes intimes du processus de rétrogradation du béton et de répéter le phénomène sur des échantillons préparés dans le laboratoire.

Le cas que nous avons eu l'occasion d'observer représente un cas typique de rétrogradation de propriétés mécaniques du béton pour l'importance des constructions qu'il a frappées, le développement lent et progressif qui s'est étendu aux autres constructions dans la même localité et construites à des époques différentes.

L'examen microscopique permet de déterminer le degré d'altération du béton. La couleur plus que jaune, le manque de consistance, la friabilité et la réduction en poudre impalpable sous l'action de la faible pression des doigts sont les aspects les plus évidents du processus de rétrogradation qui a frappé les éléments les plus fins des mortiers.

Le phénomène de rétrogradation a frappé d'une façon plus intense les bétons où les graviers font défaut alors que la proportion de sable composé d'éléments fins, est élevée. Au contraire dans les bétons de meilleures compositions granulométriques, contenant une plus grande proportion de gravier, tous ces phénomènes ne

rencontrent pas ou à un degré moindre. On a aussi remarqué pendant les travaux de démolition et de reconstruction des poutres et des piliers les plus détériorés, que les armatures étaient couvertes d'une épaisse couche de rouille, même à proximité des encastremements où les fers sont protégés d'une couche de béton de 4 à 5 cm., pendant ainsi pratiquement nulle l'adhésion au béton. On sait que le fer même exposé à l'humidité ne s'oxyde qu'en présence d'anhydride carbonique et d'oxygène; que l'infiltration de l'anhydride carbonique est normalement arrêtée par l'hydrate de chaux qui se développe pendant la

prise du béton, mais surtout par la compacité du béton. Pour certains hourdis détériorés l'altération a intéressé toute l'épaisseur du béton. Au contraire, dans les piliers, l'altération s'est limitée aux parties extérieures laissant un noyau central dont la ligne de démarcation est facile à reconnaître à l'œil nu. Les parties altérées sont jaunâtres, quant aux autres, elles sont plus grises. La différence est plus évidente si on emploie un indicateur dont la sensibilité est comprise entre $\text{PH} = 8,3$ à 11 ; avec de la *phénolphthaleine* en solution alcoolique le noyau apparaît en rouge, tandis que la partie altérée reste incolore.

Première Partie

Examen des échantillons de béton détérioré

Nous avons remarqué au moyen du microscope stéréoscopique que les échantillons de béton détérioré montrent un grand nombre de petits alvéoles uniformément répandus dans la masse. La *substance cimentante* ne remplit pas tous les vides et se montre réunie irrégulièrement dans les petits grumeaux isolés. Il manque presque complètement l'adhérence de la surface glabre des grains cristallins de sable avec ces grumeaux de la substance cimentante.

Nous avons déterminé sur des échantillons :

a) le poids de volume; b) le poids spécifique; c) le coefficient de porosité; d) le coefficient d'imbibition; e) l'humidité sur des échantillons séchés et sur des échantillons tout-venants.

Examen chimique.

1) *Prémises*. — Nous avons déjà exposé les caractéristiques du procédé de rétrogradation et nos recherches ont eu pour but de déterminer les transformations chimiques anormales qui se sont réalisées dans nos bétons. La friabilité des bétons étudiés était tellement accentuée que nous avons pu, au moyen d'un simple et grossier tamis, séparer le gravier du sable; ensuite, un tamis de 400 mailles par cm^2 nous a permis de séparer le ciment et la partie plus fine du sable.

L'analyse chimique de toutes ces fractions nous a permis de déterminer la quantité de ciment dans l'échantillon original et toutes les données ont été corrigées des fautes provenant de la présence du sable et de ses constituants solubles.

Nous avons aussi analysé plusieurs échantillons de béton, en séparant par voie mécanique tous les graviers, les pierres cassées et presque tout le sable. L'analyse des deux échantillons de béton détérioré a donné ces résultats :

Pierres cassées	23,61 %
Sable gros ($\text{Ø} > 1$ mm.)	17,01 %
Sable fin ($\text{Ø} = 1$ à 0,5 mm.)	37,00 %
Sable très fin ($\text{Ø} < 0,5$ mm.)	7,33 %
Ciment hydraté	15,05 %
	100,00 %
Ciment	12,94 %
Eau combinée et anhydride carbonique	2,11 %

Tous ces pourcentages sont en poids.

Nos déterminations nous donnent un poids de volume de 2040 Kg./m^3 pour le béton, c'est-à-dire un dosage de ciment de $0,1294 \times 2040 = 264 \text{ Kg./m}^3$. Ce dosage est faible.

Nous ne croyons pas que le défaut de ciment soit la cause d'une tardive et progressive détérioration des bétons. Les pourcentages de $-\text{SO}_3$, $-\text{Cl}$, $-\text{Mg}^{++}$ dans les bétons analysés sont tout à fait négligeables et aucune détérioration ne peut être attribuée à ces constituants. Nous avons observé des piliers où la détérioration est notable à la surface; aussi les bétons, jaunâtres à la surface, ont-ils les couches intérieures grises.

La seule différence dans la composition pondérale que nous avons pu rencontrer entre les couches extérieures et les couches intérieures est le pourcentage différent d'anhydride carbonique.

L'analyse chimique des échantillons intérieurs et extérieurs nous montre une très grande différence dans la quantité d'anhydride carbonique.

La grande porosité des bétons est la cause essentielle de la rapide absorption de l'anhydride carbonique. La transformation de l'hydrate de calcium en carbonate porte aussi à une variation des volumes moléculaires; le volume de la molécule d'hydrate de calcium est 54 \AA^3 , tandis que le volume de la molécule du carbonate (calcite) est 60 \AA^3 avec un accroissement de 11,11 %. Cet accroissement de volume, lorsque le béton est suffisamment compact, peut donner une réaction interne, égale aux efforts occasionnés par cet accroissement de volume et rendre le béton plus compact et mieux capable de réagir aux sollicitations extérieures. Enfin, l'accroissement de compacité empêche l'affluence vers l'intérieur de l'anhydride carbonique.

La grande porosité initiale du béton détérioré n'a pas permis cet accroissement de la capacité de travail. Nous croyons que l'anhydride carbonique et la porosité du béton ont causé l'hydrolyse des constituants stables du ciment, jusqu'à une décomposition des silicates et alluminates, selon un procédé tout à fait semblable à celui des silicates naturels.

Nous avons pu déduire de toutes nos données analytiques que le ciment employé dans cette construction était un mélange de ciment Portland artificiel avec une addition de 40 % au moins de roche silico-calcaire crue, finement broyée.

Ces mélanges sont actuellement beaucoup employés. La grande diffusion des ciments additionnés et les bons résultats qu'on en obtient ne laissent pas considérer l'addition au ciment des substances inertes comme la cause principale de la rétrogradation du béton. Une preuve nous en est donnée par la présence dans les mêmes constructions de portions faites avec le même ciment et qui ne sont pas détériorées.

Examen du sable.

Nous avons déterminé la composition granulométrique du sable employé et examiné son altérabilité chimique pour rechercher l'influence de ces facteurs dans la détérioration du béton. Nous avons trouvé que la composition granulométrique est très peu appropriée pour la construction du béton par suite de la grande quantité des por-

tions fines (95 % $\Phi \leq 1 \text{ mm.}$) et, conséquemment par le petit poids de volume.

On a trouvé :

Poids spécifique moyen du sable	2.79
Poids de volume du sable non tassé	1.65

L'examen microscopique laisse distinguer clairement les éléments calcaires en quantité peu élevée et les cristaux provenant de la décomposition des roches trachytiques et leucitiques. On peut même observer les éléments feldspathique et quartzeux, certains silicates basiques colorés et des cristaux de magnétite.

La magnétite et une fraction des silicates basiques contenus dans le sable sont assez altérables mais nous croyons que dans l'intérieur de bétons non détériorés les processus de dégradation atmosphérique ne peuvent pas s'accomplir. L'altération hydrolytique des silicates doit être empêchée par l'alcalinité des mortiers.

Nous avons malgré cela comparé le sable de bétons détériorés avec d'autres sables très employés dans les constructions de la ville de Milan en déterminant la quantité de substance argileuse formée pendant quelques mois par l'action corrompante et accélérée de l'anhydride carbonique de l'oxygène et de l'eau. Nous avons trouvé que dans les échantillons de sable employés pour la confection des bétons détériorés la quantité de produits argileux qui se sont formés pendant ces expériences est plus forte que dans les autres échantillons.

Cependant ce phénomène, d'un point de vue quantitatif ne peut pas être considéré comme la cause essentielle de la rétrogradation du béton confectionné avec ce sable. L'alcalinité de la pâte de ciment empêche l'hydrolyse des minéraux les plus altérables qui sont aussi les plus basiques.

Toutes les dernières études sur la résistance des bétons, c'est-à-dire les recherches de MM. Abrams, Feret, Talbot et Richards et enfin de M. Bolomey, nous donnent des relations entre la charge de rupture, la porosité, la quantité de ciment et enfin l'eau de gâchage.

Les formules proposées par ces auteurs nous laissent la possibilité de calculer l'affaiblissement des propriétés mécaniques pour un accroissement de la porosité et la quantité d'eau de gâchage mais nous ne pouvons pas appliquer ces formules car les porosités que nous avons retrouvées dans les bétons plus détériorés sont trop élevées et hors du champ d'application de ces formules.

La haute porosité des bétons détériorés es

ie au pourcentage élevé du sable (plus de 60 % en poids).

On peut considérer, en sachant que le poids de volume du sable est 1,658 Kg./m³, que 1 m³ de béton contient plus de 750 l. de sable.

Le sable employé avait un pourcentage de vides de 41 %; ainsi le mélange de sable et de gravier avait 31 % de vides et les 100 à 120 litres de ciment hydraté ne pouvaient les remplir complètement.

Concentration des ions hydrogènes dans les bétons détériorés.

Nous avons déjà indiqué que les échantillons des bétons détériorés sont neutres à beaucoup d'indicateurs jusqu'à une profondeur considérable.

Ce phénomène est plus accentué dans les échantillons plus détériorés, et quelques planchers sont neutres dans toute leur épaisseur.

Dans des piliers détériorés plus anciens on observait, trois ans après leur construction, la réaction alcaline à une profondeur de 3 à 4 cm.,

parfois, seulement à plus de 8 cm.

Nous avons observé que les portions extérieures du béton détérioré colorées en jaune tiennent dans des solutions aqueuses en équilibre avec les phases solides un PH peu supérieur à 8, pratiquement égal à celui du carbonate de calcium. La portion intérieure qui est plus grise tient un PH supérieur à 12.

L'aluminate tricalcique s'hydrolyse à un PH 12,3; tous les autres aluminates à des PH peu supérieurs à 11, pendant que le ferrite et le silicate dicalciques s'hydrolysent à PH = 13.

Nous croyons pour cela que la portion extérieure du béton détérioré ne contient plus aucun de ces constituants (aluminates tri- et dicalciques hydratés, silicate et ferrite dicalcique) qui, selon les hypothèses courantes, sont avec l'hydrate de calcium les liants du béton.

Ce phénomène d'hydrolyse est la cause du pourcentage plus élevé de silice insoluble dans les échantillons provenant des bétons extérieurs.

L'acide silique formé par hydrolyse a donc subi un processus de déshydratation et de vieillissement.

Deuxième Partie

Essais sur des échantillons préparés en laboratoire.

Les données précédentes nous conseillent d'attribuer la rétrogradation du béton à sa mauvaise composition granulométrique et par conséquent à sa haute porosité. Les agents atmosphériques ont pu ainsi opérer avec une rapidité très grande, pendant qu'ils agissent dans les bétons ordinaires avec une grande lenteur et avec des effets complètement différents. Pour confirmer cette hypothèse nous avons préparé en laboratoire, avec le même sable employé dans la confection des bétons détériorés, beaucoup d'échantillons de mortiers avec des proportions suivantes : 200 et 300 Kg. de ciment; 400, 600 et 800 litres de sable; 150 et 200 litres d'eau.

On a naturellement toujours exclu dans ces échantillons le gravier, car il n'a apporté dans le béton détérioré aucune action directe sur le procédé chimique de rétrogradation.

Pour chaque proportion on a fait 8 échantillons; quatre avec un ciment naturel, quatre avec un ciment artificiel, additionné de poudre très fine de roche silico-calcaire en quantité telle (pres-

que 50 %) que le ciment résultant présentait dans les mortiers normaux à peu près la même résistance que le ciment naturel.

Le but de nos expériences était la recherche de données comparatives entre les ciments naturels et les ciments artificiels additionnés.

Une moitié des échantillons a été conservée dans la cave du laboratoire, l'autre moitié, après un mois de conservation à l'air, a été placée dans une atmosphère d'anhydride carbonique humide sous une pression de 10 mm. de mercure au-dessus de la pression atmosphérique.

On a déterminé, pour tous les échantillons :

- 1) Les poids de volume.
- 2) La charge de rupture.
- 3) L'épaisseur de la couche carbonatée.

Dans les échantillons qui ont été plongés pendant deux mois dans l'anhydride carbonique, la carbonatation s'est propagée avec une grande vitesse; seulement les échantillons plus riches en ciment présentaient encore un noyau avec réac-

TABLE

N° de l'échantillon.	Type du ciment.	Dosage du ciment en kg.	Dosage du sable en litres.	Eau de gâchage en litres.	Poids de volume. Echantillons conservés neuf mois à l'air.	Charges de rupture en kg./cm ² .		
						Echantillons conservés trois mois à l'air.	Echantillons conservés neuf mois à l'air.	Echantillons conservés trois mois à l'air et un mois en CO ₂ humide.
1	Naturel	250	400	200	2065	108	134	245
2	"	250	600	200	1953	62	76	124
3	"	250	800	200	1907	45	48	88
4	"	300	400	200	2013	134	130	252
5	"	300	600	200	1954	79	97	175
6	"	300	800	200	1968	58	70	121
7	"	250	400	150	1946	120	130	273
8	"	250	600	150	1907	81	97	138
9	"	250	800	150	1797	58	65	68
10	"	300	400	150	1989	155	151	308
11	"	300	600	150	1977	110	130	220
12	"	300	800	150	1903	65	75	117
13	Artificiel additionné	250	400	200	1997	100	130	128
14	"	250	600	200	1951	88	90	84
15	"	250	800	200	1915	50	57	0
16	"	300	400	200	2037	153	169	188
17	"	300	600	200	1974	122	128	132
18	"	300	800	200	1952	28	23	0
19	"	250	400	150	2050	150	166	203
20	"	250	600	150	1981	104	120	126
21	"	250	800	150	1934	54	64	56
22	"	300	400	150	2113	238	304	402
23	"	300	600	150	2013	138	154	168
24	"	300	800	150	2026	86	85	80

tion alcaline; ce noyau est plus grand dans les échantillons préparés avec du ciment naturel.

Nous avons aussi déterminé pour les échantillons conservés à l'air la porosité. Les résultats de nos essais sont résumés dans la table.

Voici nos principales observations :

Comparaison entre les ciments.

a) Echantillons conservés à l'air.

Les échantillons confectionnés avec du ciment additionné ont révélé, après trois mois, des charges de rupture un peu plus hautes, surtout pour les plus hauts pourcentages de ciment et pour les faibles proportions d'eau de gâchage.

b) Echantillons conservés un mois à l'air et plongés ensuite pendant un nouveau mois dans l'anhydride carbonique.

Les échantillons confectionnés avec du ciment additionné présentaient une charge de rupture beaucoup plus faible lorsqu'il y avait de hautes pourcentages d'eau de gâchage; pour des pourcentages inférieurs on a observé une plus haute résistance dans un seul échantillon (qui avait la plus haute proportion de ciment). Tous les autres échantillons sont moins résistants que ceux qui ont été confectionnés avec du ciment naturel.

Après deux mois de séjour dans l'atmosphère d'anhydride carbonique on a confirmé ce résultat.

Influence de l'eau de gâchage sur les propriétés mécaniques.

La table nous donne des renseignements sur la variation de la charge de rupture en fonction de la quantité d'eau de gâchage. La diminution de la charge de rupture pour une augmentation

eau de gâchage de 150 à 200 l. d'eau par m³ très importante, surtout pour les échantillons confectionnés avec du ciment additionné. La différence exprimée en pourcentage entre les charges de rupture pour les susdites variations d'eau de gâchage était comprise entre 30 à 50 % pour les échantillons les plus riches en ciment et approchant de 100 % dans les échantillons les plus pauvres en ciment.

influence de la proportion ciment-sable.

La diminution de ce rapport donne aussi une diminution de la charge de rupture. Pour les échantillons confectionnés avec du ciment naturel conservé trois mois à l'air, la charge de rupture à parité d'autres conditions, se réduisait de 25 % (valeur moyenne) lorsque le dosage du ciment passait de 400 à 800 litres.

Avec le ciment artificiel additionné, la diminution est plus sensible (valeur moyenne : 64 %). La diminution était encore plus forte pour les échantillons qui ont été plongés dans une atmosphère d'anhydride carbonique humide et surtout pour ceux qui ont été confectionnés avec du ciment additionné (les valeurs moyennes étaient comprises pour les différentes proportions, entre 60 et 76 %). Seulement pour les échantillons confectionnés avec du ciment additionné et avec 200 litres d'eau de gâchage, la charge de rupture subissait la même variation de dosage du sable était restée à zéro.

influence du vieillissement.

D'après nos expériences, l'action de l'anhydride carbonique et l'action du temps sont comparables dans le béton confectionné avec du ciment naturel, soit lorsque le liant hydraulique est du ciment naturel additionné. L'action de l'anhydride carbonique a donné, pour les échantillons les plus riches en ciment naturel, des augmentations de la résistance comprises entre 88 et 96 %; pour les échantillons les plus pauvres en ciment, les augmentations sont peu inférieures (entre 25 et 36 %).

En revanche, pour les échantillons confectionnés avec du ciment artificiel additionné on a observé seulement une augmentation plus faible pour les bétons les plus riches en ciment (25 % à 36 %); pour les échantillons les plus pauvres en ciment on a de faibles augmentations ou des diminutions très graves (+ 22 % à - 100 %).

Considérations sur les poids spécifiques.

Puisque nous avons l'intention de reproduire en laboratoire les bétons et les mortiers que nous avons vu détériorer, nous avons, avant tout, contrôlé les poids de volume des échantillons préparés. Nous avons observé que les poids de volume des mortiers détériorés sont presque égaux à ceux des échantillons préparés en laboratoire, les plus riches en sable et confectionnés avec 200 litres d'eau de gâchage. En effet, pour les bétons détériorés, en décomptant le poids et le volume des pierres cassées, qui étaient présentes, on déduit un poids de volume du mortier compris entre 1850 et 1900 Kg./m².

RÉSUMÉ

On a observé un intéressant phénomène de rétrogradation tardive des propriétés mécaniques du béton dans une importante structure en béton armé.

On doit attribuer ce phénomène de rétrogradation à la concomitance de plusieurs facteurs défavorables.

La composition granulométrique des bétons étudiés, mauvaise par le défaut de pierres cassées et de gravier, par l'excès des constituants fins du sable, et aussi par l'excès probable d'eau de gâchage, augmentée par l'emploi de ciment additionné, ne pouvait donner des bétons à haute résistance, même pour des dosages normaux de ciment.

La porosité très élevée du béton et la grande surface spécifique des mortiers, dues surtout à la composition granulométrique du sable, ont permis d'importants phénomènes d'hydrolyse et de carbonatation de la chaux produite par l'hydrolyse.

Tous ces phénomènes arrivent aussi dans le béton ordinaire mais très lentement et dans une couche strictement superficielle.

Durant ce procédé d'altération du béton que nous avons reproduit dans notre laboratoire nous avons observé que la plupart de ces réactions portent un accroissement de volume. Il en résulte des conséquences bien différentes (pour ce qui concerne la résistance mécanique) selon la porosité et le dosage de ciment dans le mortier et dans les bétons.

a) Dans les bétons riches de ciment et peu

poreux le lent accroissement de volume produit un accroissement de compacité et de résistance mécanique; l'hydrolyse est extrêmement lente, puisque l'accroissement de volume porte une diminution de porosité.

On observe donc dans de tels bétons une augmentation lente et graduelle de la résistance;

b) Dans les bétons pauvres et poreux, le phénomène d'hydrolyse et de carbonatation est rapide et il n'y a qu'une négligeable augmentation de résistance pendant le temps;

c) Pour le béton très pauvre en ciment, à haute porosité et haute surface spécifique, avec une résistance mécanique initiale faible, tous ces phénomènes s'accroissent.

Dans le béton qui contient seulement une petite quantité de ciment pur on observe une rétrogradation de la résistance qui parfois, lorsque les mortiers sont confectionnés avec des ciments additionnés, peut atteindre la désagrégation naturelle du béton.