
LE CIMENT

PORTLAND
ARTIFICIEL

FABRICATION — PROPRIÉTÉS

MORTIERS
ET BETONS

PUBLIÉ PAR LE

GROUPEMENT PROFESSIONNEL DES FABRICANTS
DE CIMENT PORTLAND ARTIFICIEL DE BELGIQUE

(ASSOCIATION SANS BUT LUCRATIF)

45, BOULEVARD DU RÉGENT, 45 - BRUXELLES

Edition 1928

LE CIMENT

PORTLAND
ARTIFICIEL

FABRICATION -- PROPRIÉTÉS

MORTIERS
ET BÉTONS

PUBLIÉ PAR LE
GROUPEMENT PROFESSIONNEL DES FABRICANTS
DE CIMENT PORTLAND ARTIFICIEL DE BELGIQUE

(ASSOCIATION SANS BUT LUCRATIF)

4, RUE MONTAGNE DU PARC, 4, BRUXELLES

Actuellement : 45, Boulevard du Régent, Bruxelles

**LE GROUPEMENT PROFESSIONNEL
DES FABRICANTS DE CIMENT PORTLAND
ARTIFICIEL** exerce un **contrôle** sur les ciments
fabriqués par les usines affiliées ~ ~ ~ ~ ~

Il dispose à cet effet :

— d'un **laboratoire** pourvu de toutes installations,
machines, etc., les plus modernes ;

— d'un **personnel technique** tout spécialement
compétent ~ ~ ~ ~ ~



~ ~ La marque
ci-contre **garantit**
que le ciment est
soumis au contrôle

A la demande des acheteurs ou des consommateurs, le **LABORATOIRE DU GROUPEMENT PROFESSIONNEL** prélève des échantillons sur le ciment qui leur est fourni.

Il effectue également, sur ces échantillons ou sur d'autres échantillons qui lui seraient adressés, tous essais partiels ou complets désirés, soit suivant les normes officielles belges, soit suivant les spécifications d'autres pays.

Toute personne intéressée à l'exécution d'ouvrages au mortier ou au béton de ciment et utilisant le ciment d'une usine affiliée au **Groupeement professionnel** :

Qui désire obtenir des renseignements autres que ceux contenus dans la présente brochure,

Ou qui éprouve des difficultés dans l'exécution des travaux,

Peut s'adresser au **Groupeement**, qui lui fournira, à titre gracieux, toutes indications utiles.

INTRODUCTION

Ceci est une brochure de vulgarisation sur le ciment et ses applications. Son but est simple : rendre accessible à tous ceux qui emploient le ciment, la connaissance succincte de ce produit, sa fabrication, ses propriétés et surtout les règles de sa mise en œuvre.

A l'heure actuelle, l'emploi du ciment est si répandu dans tous les domaines et ses applications sont si variées qu'il n'est pas étonnant que ce produit mis en œuvre dans les conditions également les plus diverses, ait pu amener parfois des insuccès et susciter des mécontentements. De ce fait le béton et plus spécialement le béton armé n'ont peut-être pas encore suffisamment imposé la confiance qu'il faut accorder à un matériau de tout premier ordre. Les architectes et entrepreneurs ne sont peut-être pas encore tous suffisamment pénétrés des nombreux avantages qu'offrent les mortiers et les bétons de ciment.

Aussi peut-on attribuer le plus souvent à un défaut de documentation ou d'expérience certains jugements erronés portés sur ce matériau.

Préciser les règles de préparation et de mise en œuvre des mortiers et des bétons paraît donc utile. **Avant tout il faut absolument qu'on bannisse cette opinion fausse qu'un ciment de bonne qualité doit nécessairement fournir un bon béton ou un bon mortier. Et il n'est pas plus exact d'incriminer à priori la qualité du ciment lorsqu'un béton donne de mauvais résultats.**

La présente brochure démontre que ce n'est pas seulement le ciment et la qualité de celui-ci qui entrent en jeu dans la valeur d'un béton ou d'un mortier, mais qu'il faut tenir compte de la composition et de la nature du sable et de la pierraille, de la nature et de la quantité

d'eau de gâchage ainsi que du mode de confection des mortiers et bétons et des conditions de leur mise en œuvre.

Si tous ceux qui font emploi du ciment examinaient avec soin chacun de ces facteurs et veillaient à ce qu'il ne soit pas dérogé aux règles que les recherches et l'expérience ont établies, certains préjugés ou jugements erronés auraient tôt fait de disparaître. En outre, la réputation acquise par les nombreux travaux élevés depuis de longues années n'en serait que plus solidement assise, et diffusée parmi tous ceux (et ils deviennent de moins en moins nombreux) qui craindraient encore de faire un emploi rationnel et général du ciment.

PREMIÈRE PARTIE

Le Ciment Portland Artificiel.

ORIGINE ET DENOMINATION

1. — Bien que le produit hydraulique présentant les propriétés du ciment eût déjà été caractérisé par Vicat (France) dès 1818, la fabrication du ciment artificiel n'a vraiment été réalisée que six ans plus tard, grâce aux recherches d'*Aspdin* (Angleterre) qui, en 1824, prit une patente pour la fabrication d'un ciment à prise lente. C'est lui qui donna au produit le nom de *Portland* à cause de sa ressemblance, après durcissement, avec la pierre à bâtir qu'on trouvait à Portland, en Angleterre. Sa véritable dénomination est donc « ciment Portland ».

Pourquoi le qualificatif supplémentaire « artificiel », en usage surtout en Belgique ?

C'est qu'il existe des ciments provenant de la cuisson d'une roche calcaro-schisteuse ayant naturellement une composition chimique qui se rapproche plus ou moins de celle nécessaire pour obtenir un véritable ciment Portland. Leurs fabricants les qualifient de « Ciments Portland naturels ».

Une distinction bien nette entre les deux produits est nécessaire, car les ciments naturels ne présentent ni la même homogénéité, ni la même invariabilité dans leurs propriétés, que les ciments artificiels. En la matière, la supériorité de ceux-ci est consacrée par une longue expérience.

En réalité tout comme dans les autres pays, l'appellation de *ciment Portland* devrait suffire pour ces derniers, alors que les premiers seraient caractérisés par la dénomination de *Ciment naturel*.

Notions succinctes sur la fabrication et la composition du Ciment Portland Artificiel.

Progrès réalisés.

FABRICATION

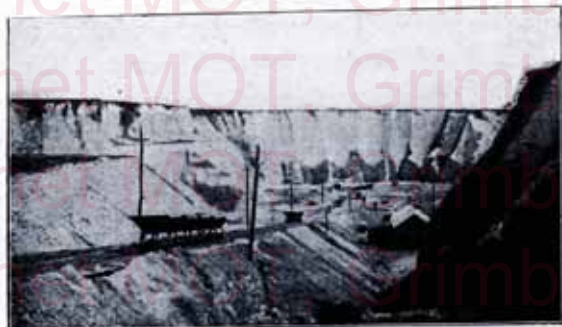
2. — Le ciment Portland artificiel est obtenu en partant de mélanges artificiels de carbonate de chaux et d'argile ou de toutes autres matières renfermant du calcaire, de la silice et de l'alumine.

Ces mélanges rigoureusement dosés, finement moulus et parfaite-



Carrière d'argile.

ment homogénéisés dans toutes leurs parties, sont soumis à la cuisson jusqu'à commencement de ramollissement. La mouture de la roche

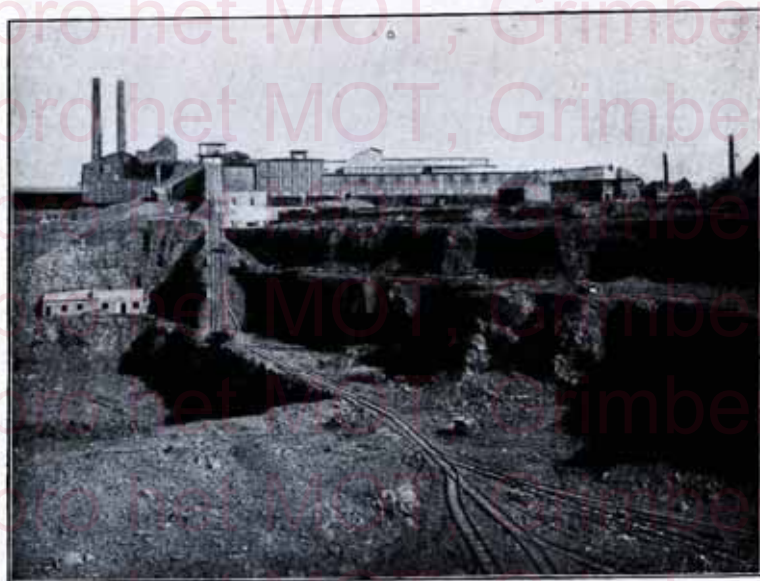


Carrière de craie.

scorifiée (ou « Clinker ») ainsi obtenue, donne une poudre fine qui constitue le ciment Portland artificiel.

En Belgique, en général, les matières utilisées sont la *craie* et l'*argile*, et le procédé de fabrication employé est celui appelé par « voie humide »; dans ce procédé, la craie et l'argile (ou éventuellement d'autres matières calcaires, marneuses et schisteuses, au besoin préalablement broyées) sont *mélangées en proportions déterminées* dans un excès d'eau de manière à former une pâte assez épaisse mais encore suffisamment fluide. Celle-ci est *finement moulue* ce qui amène un mélange très intime des matières premières et favorise la cuisson.

Cependant les usines du Tournaisis emploient le procédé par « voie sèche ». Elles utilisent comme matières premières une pierre de l'endroit dont la composition chimique se rapproche de celle des mélanges arti-



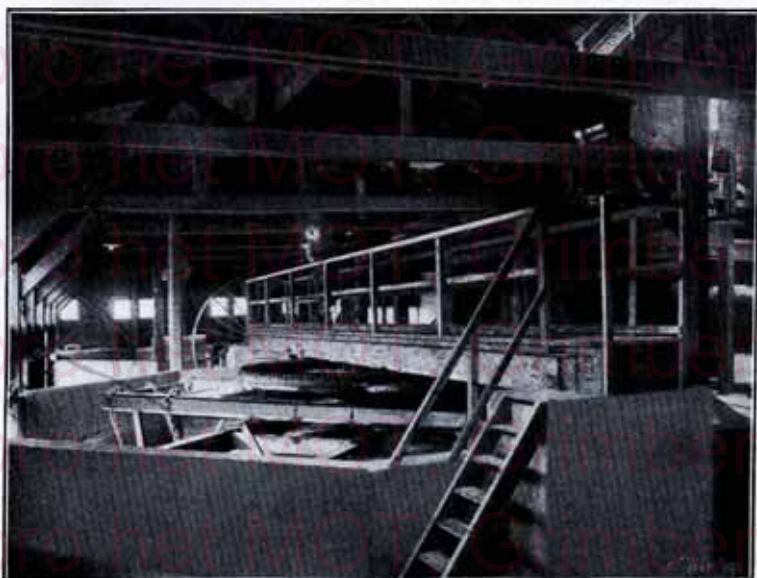
Carrière de calcaire argilo-siliceux.

ficiels. Certaines usines concassent la pierre et la réduisent en une poudre fine qui est envoyée aux fours rotatifs. C'est le procédé dit « direct ». D'autres cuisent d'abord la pierre dans des fours à chaux, à une température de 800° à 900°. Au sortir des fours à chaux, la pierre cuite est finement pulvérisée et la farine ainsi obtenue est introduite dans les fours rotatifs. Ce procédé est connu sous la dénomination de « double cuisson ».

Toutes les usines belges sont pourvues de fours rotatifs pour la cuisson des matières. Ces fours sont de forme cylindrique et mesurent 30 à 70 mètres de longueur sur 2 à 3 mètres de diamètre; ils sont légère-

ment inclinés sur l'horizontale et animés d'un mouvement de rotation lent autour de leur axe.

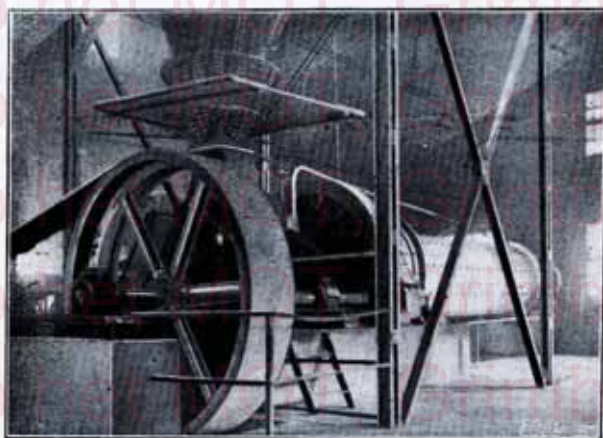
Le chauffage de ces fours s'effectue au moyen de charbon pulvé-



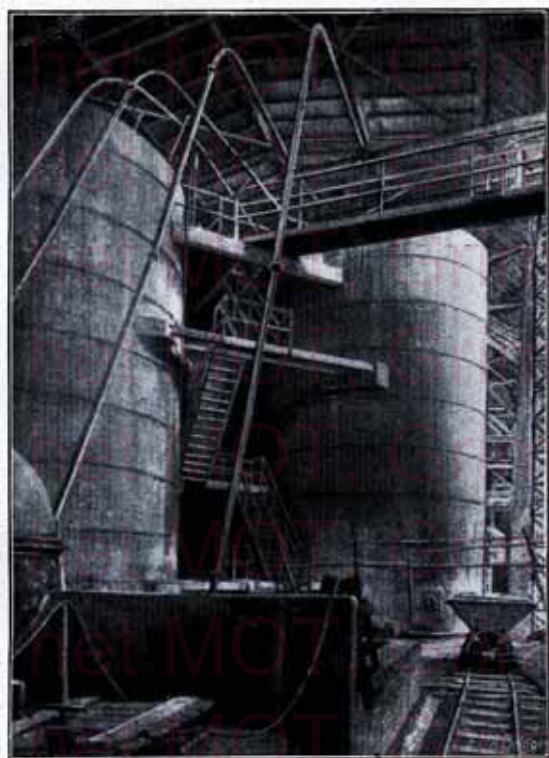
Malaxeur des matières premières (voie humide).

risé; il est activé par soufflage d'air. La partie du four où s'effectue la combustion du charbon est appelée « zone de cuisson ».

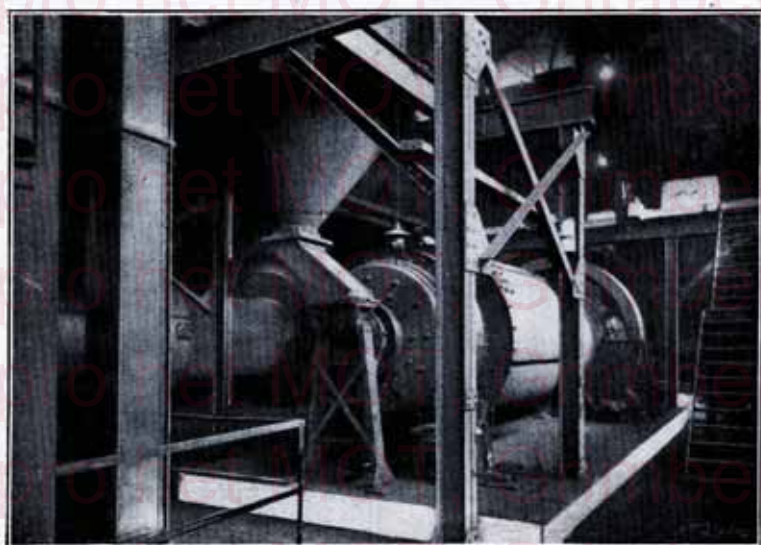
Dans le procédé par voie humide, après avoir subi, dans de vastes bassins homogénéisateurs, une série de contrôles et de corrections de



Moulin pour la mouture de la pâte.



Cuves à pâte. — Bassins homogénéisateurs.



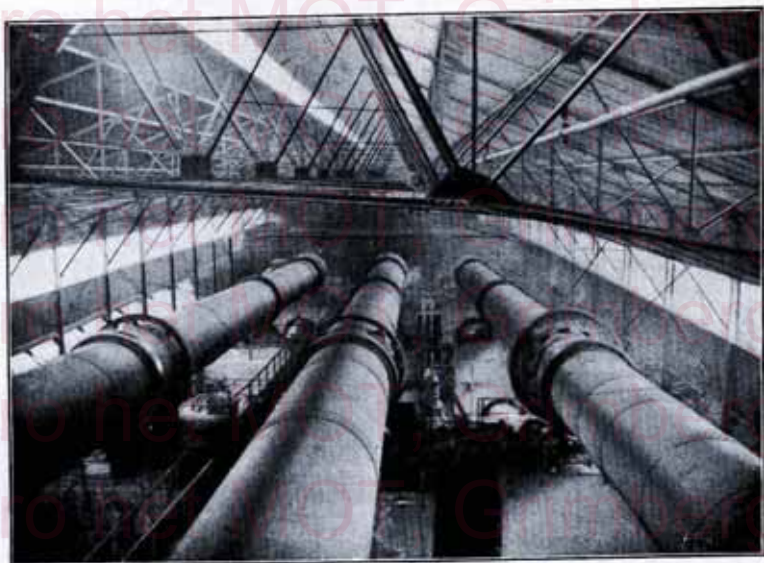
Broyeur à charbon.

dosage, la pâte à l'état liquide est introduite dans le four par l'extrémité opposée au chauffage. Par l'effet de l'inclinaison et de la rotation du four, la pâte chemine vers la zone de cuisson et subit successivement la dessiccation, la calcination et, vers $1,450^{\circ}$, la cuisson finale jusqu'à ramollissement et commencement de vitrification.

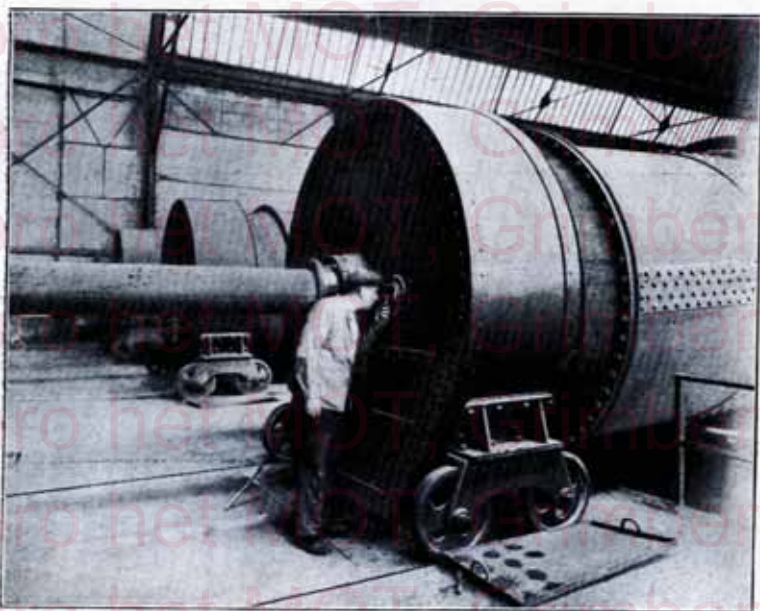


Fours rotatifs.

Dans les usines ayant recours au procédé par « voie sèche » la composition chimique de la pierre réduite en poudre est contrôlée et corrigée de façon à la porter et à la maintenir à la composition voulue. La cuisson des matières sèches ainsi homogénéisées s'exécute d'une



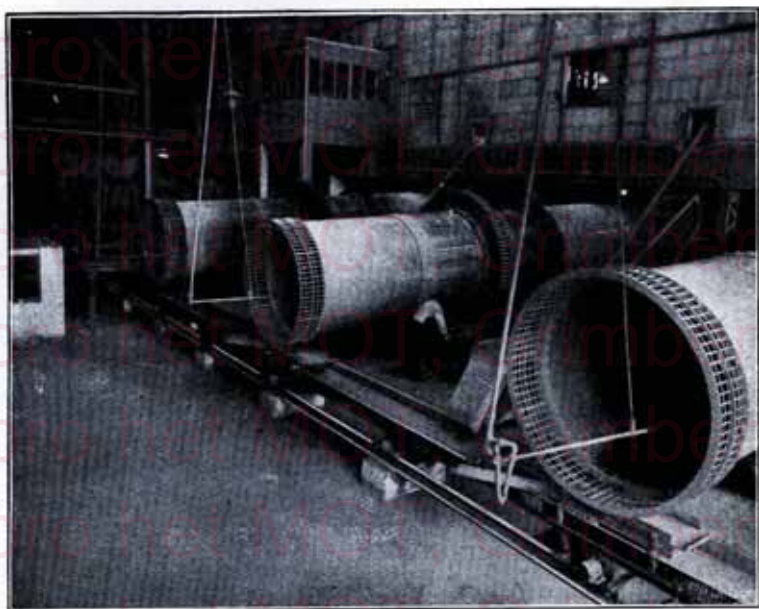
Fours rotatifs.



Contrôle de la bonne marche du four.



Fours rotatifs. — Tube refroidisseur du clinker (voir le four de droite).



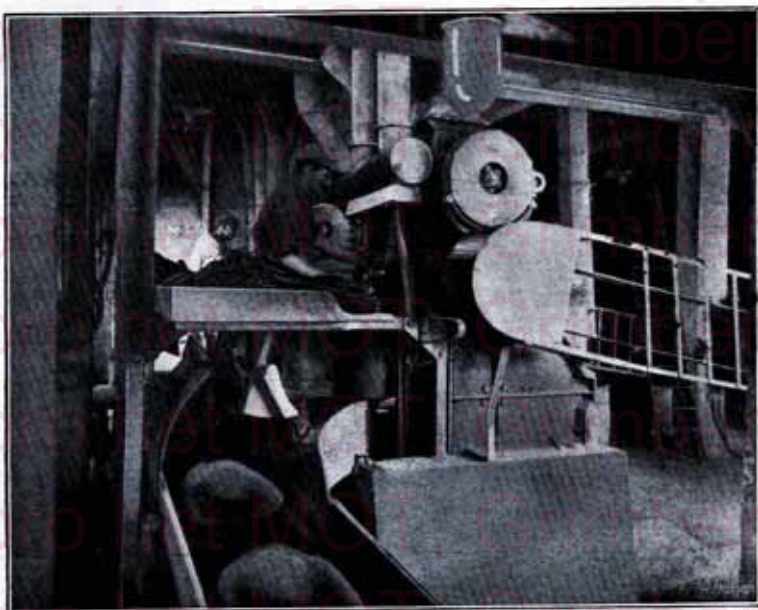
Tubes refroidisseurs du clinker (sortie du clinker).



Silos à ciment.

façon identique à celle qui vient d'être décrite pour le procédé par voie humide.

Dans les deux procédés, les produits de la cuisson ont l'aspect de roches scorifiées et sont dénommés « clinkers » ; ils se présentent sous



Ensachage automatique Bates.



Embarillage.

la forme de grains irréguliers de dimensions variables, en moyenne de 1 centimètre de diamètre, et de couleur foncée, noir verdâtre.

A la sortie du four les clinkers tombent et passent dans des tubes refroidisseurs avant d'être emmagasinés. Après un repos plus ou moins long dans les silos ou sous les hangars, ils sont additionnés d'une minime proportion de gypse, broyés et *moulus finement* et constituent à cet état pulvérulent, le ciment Portland artificiel.

Le ciment est alors emmagasiné dans des silos de vaste capacité, d'où il est repris, à mesure des besoins, pour l'ensachage ou l'emballage.

Le ciment est généralement livré, en Belgique, en sacs de 50 kilos; la fourniture en sacs d'autres contenances ou en barils n'a lieu que sur certains marchés d'exportation.

COMPOSITION CHIMIQUE

3. — De la composition des matières premières on peut déduire plus ou moins exactement la nature des constituants chimiques du Ciment Portland artificiel.

Les argiles, silicates doubles d'alumine et de fer et les craies, carbonates de chaux, fournissent, à la cuisson, principalement des silicates et des aluminates de chaux.

Toutefois les matières premières contiennent toujours une certaine proportion d'éléments considérés habituellement comme impuretés, notamment de la magnésie et des alcalis.

On peut admettre comme limites approximatives de composition chimique des ciments, les proportions suivantes :

Chaux (CaO)	58	à 67 p. c.
Silice (Si O_2)	18	à 27 —
Alumine ($\text{Al}_2 \text{O}_3$)	4	à 11 —
Oxyde de fer ($\text{Fe}_2 \text{O}_3$)	2	à 5 —
Magnésie (Mg O)	0.5	à 3 —
Alcalis (K_2O et Na_2O)	0	à 2 —
Anhydride sulfurique (SO_3)	0.75	à 3 —

Ces proportions s'entendent pour un ciment débarrassé de toute humidité.

L'anhydride sulfurique provient surtout du gypse ou du plâtre ajouté au clinker avant mouture, dans le but de régulariser la prise du ciment.

PROGRES DE L'INDUSTRIE DU CIMENT. — SUPERCIMENT

4. — Ainsi qu'il vient d'être exposé, l'invention du Ciment Portland remonte à un siècle. Pendant vingt à vingt-cinq années, les procédés de fabrication restèrent rudimentaires.

Vers 1850 une usine, à Boulogne-sur-Mer, parvint à réaliser la fabrication d'un produit de composition et de qualité régulières. D'autres suivirent, tant en Angleterre et en Allemagne qu'en France, et à partir de 1860 la fabrication du ciment prit, dans ces pays, une grande extension.

Dix années environ plus tard, la fabrication du ciment artificiel fut également entreprise en Belgique.

A la suite des progrès réalisés successivement dans la fabrication, l'industrie du ciment, depuis bientôt un demi-siècle, a mis à la disposition de l'ingénieur un nouveau matériau qui lui a permis d'établir une nouvelle technique de la construction.

Les applications croissantes qui s'en sont suivies ont puissamment stimulé les efforts tendant à l'amélioration continue de la fabrication du ciment, efforts qui, à la fin du siècle dernier, ont notamment abouti à la mise au point et à l'emploi industriel du four rotatif pour la cuisson.

L'extension de l'utilisation de ces fours et le perfectionnement successif des appareils de mouture de la pâte et du clinker, enfin les soins plus minutieux apportés au dosage et à l'homogénéisation de la pâte, ont progressivement amélioré les qualités du ciment au cours des dernières années précédant la guerre.

Les exigences de la guerre ont provoqué de nouvelles recherches. Il fallait, en effet, des ouvrages de protection contre les tirs d'artillerie, des fondations pour pièces lourdes, enfin des travaux de communication de plus en plus résistants et capables d'être mis en service au bout de temps de plus en plus courts.

Les résultats obtenus ont été vraiment remarquables, notamment en ce qui concerne la mise au point de la fabrication industrielle du ciment *alumineux* ou *ciment fondu*.

Ce ciment, dont la composition chimique diffère sensiblement — au point de vue de la proportion des constituants — du ciment Portland artificiel, présente l'avantage de durcir très rapidement et d'offrir, très peu de temps après la mise en œuvre du mortier ou du béton, une très grande résistance.

Les fabricants de ciment Portland artificiel se sont efforcés, sans

modifier sensiblement ni la composition ni les procédés de fabrication de leur produit, d'arriver à la production de ciments présentant les mêmes qualités de haute résistance et de durcissement rapide. Le succès a couronné leurs efforts et l'on trouve actuellement sur le marché des superciments Portland présentant une rapidité de durcissement et des résistances comparables à celles du ciment fondu. Ces recherches ont aidé à mettre les fabricants en mesure de contrôler avec précision tous les facteurs de la fabrication et de réaliser en toute sûreté, telle qualité déterminée pour leur produit.

Il résulte notamment de cette situation, la nécessité d'établir une classification des ciments Portland artificiels suivant leurs qualités ou leurs propriétés spéciales.

Il convient de les ranger en trois catégories :

1° *Ciment Portland artificiel normal* (P. A. N.), destiné à l'exécution de travaux n'exigeant pas des résistances ou des délais de mise en service exceptionnels ;

2° *Ciment Portland artificiel à haute résistance* (P. A. H. R.), pour les ouvrages devant présenter assez rapidement des résistances élevées, soit à la traction et à la compression, soit à l'usure ;

3° *Ciment Portland artificiel à haute résistance et à durcissement rapide* (P. A. D. R.), pour les ouvrages devant en outre résister, dans le délai le plus réduit possible, aux efforts auxquels ils sont soumis.

Les ciments des catégories 2 et 3 sont généralement désignés sous la dénomination de *ciments spéciaux* ou *superciments*.

Il est à remarquer que la tendance actuelle de l'industrie du ciment est de relever encore le niveau moyen de qualité des produits de fabrication courante, si bien qu'il est permis d'affirmer que tous les ciments Portland artificiels courants sont de qualité remarquable.

Pour combattre certains préjugés, il n'est pas inutile d'attirer l'attention sur le fait que les *superciments ne sont pas des produits de composition nouvelle*, dont on pourrait mettre en doute les qualités de stabilité et de résistance à longue échéance. Les *Super Portland ne sont que de vrais Portland* : leur composition chimique essentielle est la même ; mais par des soins tout spéciaux, l'industrie du ciment en a développé à un degré inattendu les qualités latentes. On peut donc, sans aucune crainte leur attribuer, en les renforçant, toutes les propriétés du ciment Portland courant.

Principales caractéristiques du Ciment

Portland Artificiel.

Remarques pratiques auxquelles ces caractéristiques donnent lieu du point de vue de l'emploi du ciment.

I. — PRISE

5. — Chacun sait que si l'on gâche du ciment avec de l'eau, il se produit, après un certain temps, une solidification lente de la masse pâteuse. *C'est ce passage à l'état solide qu'on appelle le phénomène de prise.*

Il s'effectue aussi bien à l'air que sous eau et on l'explique par l'action d'hydratation et de cristallisation des silicates et des aluminates de chaux, les deux constituants principaux des ciments.

La *durée de prise* est intéressante à connaître en vue des applications du ciment. Les *Portland artificiels* sont à prise lente, c'est-à-dire que le commencement de la solidification, compté à partir du moment du gâchage de la pâte de ciment pur, ne se manifeste jamais avant quarante-cinq minutes, généralement entre deux et quatre heures; la fin de la prise est également variable et se produit généralement entre trois et douze heures (1).

On dispose ainsi sur les chantiers, d'un temps suffisant — mais parfois assez réduit — pour mettre en œuvre les mortiers et bétons avant le commencement de la prise.

Ils convient toutefois de remarquer que les mortiers et les bétons font prise un peu moins vite que la pâte de ciment pur et notamment d'autant moins vite qu'ils sont plus pauvres en ciment.

En tout cas, *mettre les mortiers et bétons en œuvre avant tout*

(1) Le commencement et la fin de la prise sont déterminés, dans les laboratoires, au moyen d'un appareil spécial. On peut considérer pratiquement comme commencement de la prise le moment où la pâte de ciment commence à offrir une certaine augmentation de résistance à la pénétration du doigt dans la masse, et comme fin de la prise, le moment où la surface de la pâte n'est plus rayée par la pression de l'ongle.

commencement de solidification est une règle à observer strictement, car l'enfreindre c'est détruire, sans espoir de retour, le travail de cristallisation, facteur de la prise et du durcissement ultérieur du ciment.

De ce point de vue, les *super Portland* doivent spécialement retenir l'attention, car leur prise, tout en restant lente, est généralement plus accélérée que celle du ciment Portland normal.

Est-il besoin d'ajouter que le *regâchage* (1), malheureusement encore pratiqué pour les mortiers de chaux hydraulique, est à *proscrire rigoureusement pour les mortiers et bétons de ciment.*

Le temps relativement restreint nécessaire à l'achèvement de la solidification du ciment Portland offre, d'autre part, l'avantage de permettre un avancement rapide et économique des travaux en élévation.

CAUSES DE VARIATIONS DANS LA DURÉE DE LA PRISE DU CIMENT

6. — L'influence primordiale de certains facteurs sur le phénomène de prise est généralement peu connue ou du moins très souvent négligée.

Il s'agit plus particulièrement :

- 1° De la quantité et de la nature de l'eau de gâchage;
- 2° De la température et spécialement de la gelée.

a) *Quantité d'eau de gâchage.*

La durée de prise est fortement influencée par la quantité d'eau utilisée pour le gâchage du ciment pur, des mortiers et des bétons.

La prise est d'autant plus lente que la proportion d'eau est plus grande. A partir d'un certain excès d'eau la prise ne se produit même plus, le ciment, trop dilué, forme alors ce qu'on appelle la *laitance*.

Dans l'exécution des bétonnages sous eau, une certaine quantité de cette laitance se forme nécessairement; il faut avoir soin d'évacuer celle-ci, surtout aux joints de reprise, sous peine de rompre la continuité de liaison dans l'ouvrage.

Dans les travaux très exposés à la pluie, tels les bétonnages de routes, il y a lieu également d'éviter la dilution trop grande du ciment.

Les ouvrages exécutés à l'air font prise plus rapidement que ceux effectués sous eau.

Une température trop élevée et l'exposition aux ardeurs du soleil peuvent occasionner une dessiccation trop intense, des prises très rapides et incomplètes, et créer une couche friable à la surface des ouvrages.

(1) Nouveau malaxage des mortiers qui sont restés inemployés sur les chantiers pendant plusieurs heures, parfois pendant toute une nuit.

b) *Action de la température et notamment de la gelée.*

L'élévation de température accélère la prise tandis que l'abaissement de la température la ralentit et peut même l'arrêter, par suite de congélation, à quelques degrés sous zéro.

Mais la gelée n'a pas sur les ouvrages au ciment l'effet désastreux qu'elle produit sur la maçonnerie à la chaux hydraulique. On peut

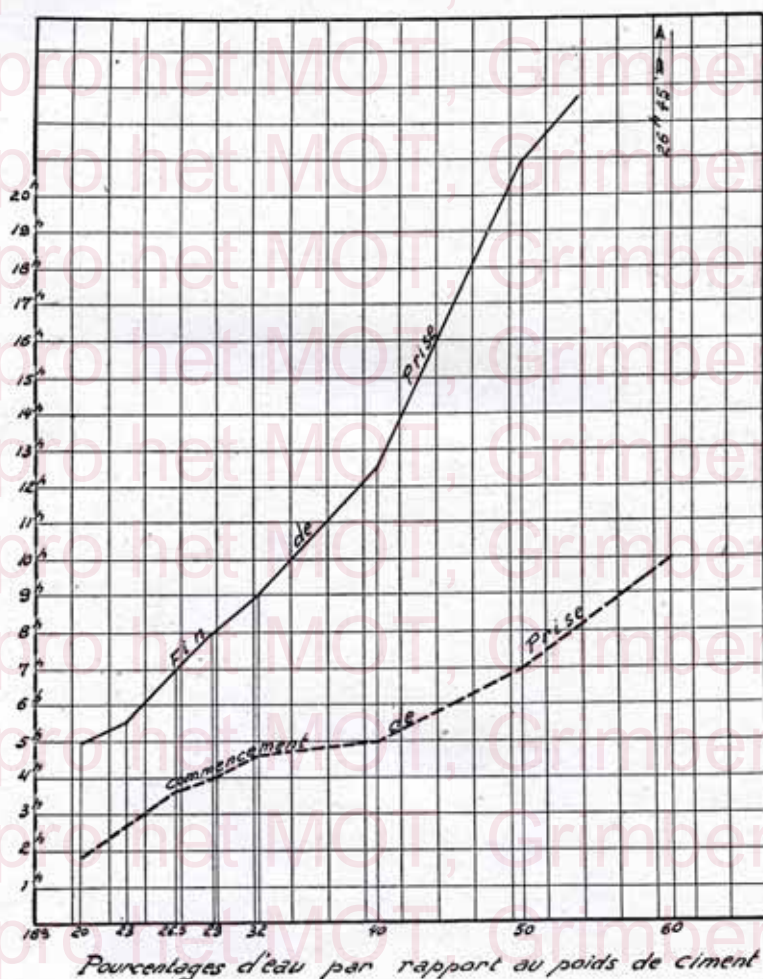


DIAGRAMME I.

Variation de la durée de prise de la pâte de ciment pur en fonction de la quantité d'eau de gâchage.

mettre en œuvre, sans danger, mortiers et bétons jusqu'à des températures de -1° à -2° C. Il convient toutefois d'être prudent dans l'exécution des travaux à ces basses températures et de protéger les ouvrages contre les atteintes de la gelée.

Il faut surtout craindre la congélation de l'eau de gâchage au cours de la prise. Cette congélation s'effectue avec augmentation de volume, amène la dislocation interne du mortier ou du béton déjà en train de faire prise et contrarie fortement son durcissement ultérieur.

Pour écarter ce danger, il est recommandé de faire usage de dosages plus riches en ciment et de mettre les mortiers et bétons en œuvre avec un minimum d'eau en vue d'activer la prise et d'éviter ainsi d'exposer un excès d'eau à la congélation. Pour des travaux exécutés en prenant ces précautions on peut admettre que le phénomène de prise n'est que très ralenti ou suspendu et qu'il reprend dès que la température devient plus clémente, sans que les autres propriétés des mortiers et bétons en soient affectées.

Est à proscrire le regâchage des mortiers et bétons de ciment qui ont été congelés avant leur emploi et qu'on serait tenté d'utiliser au premier dégel.

Dans notre pays, les gelées sont rarement intenses et de longue durée. Très souvent la nuit et le jour présentent des alternatives de gel et de dégel; les travaux exécutés le jour dans de bonnes conditions doivent être particulièrement bien protégés la nuit.

Enfin, on peut rendre possible le travail à des températures plus basses encore, atteignant même -10° C., soit en réchauffant les matières: sable, pierrailles et eau de gâchage, soit en abaissant la température de congélation de l'eau de gâchage par addition de sels, tels que: sel marin, chlorure de calcium, carbonate de soude.

On trouvera plus loin, dans les « Règles pratiques d'emploi des mortiers et bétons » les proportions de ces sels qu'on peut admettre sans danger dans l'eau de gâchage (n° 66).

L'emploi des *Super Portland* plus actifs, peut également être recommandé par temps froids.

c) Influence de la nature de l'eau de gâchage.

C'est par les sels qu'elle tient en dissolution, soit naturellement, soit artificiellement, que l'eau exerce sur la prise une action retardatrice ou accélératrice.

Abstraction faite de l'influence de la température et de celle de la proportion d'eau de gâchage, les effets de ces sels peuvent être résumés comme suit:

Sels ralentissant la prise:

Les sels contenus dans l'eau de mer;

Le chlorure de calcium en petite quantité;

Le gypse : c'est à dessein, du reste, qu'on ajoute un faible pourcentage de sulfate de calcium au ciment Portland artificiel en vue d'en ralentir et d'en régulariser la prise ;
La chaux éteinte ralentit également la prise.

Sels accélérant la prise :

Chlorure de calcium en grande quantité ;
Carbonate de soude.

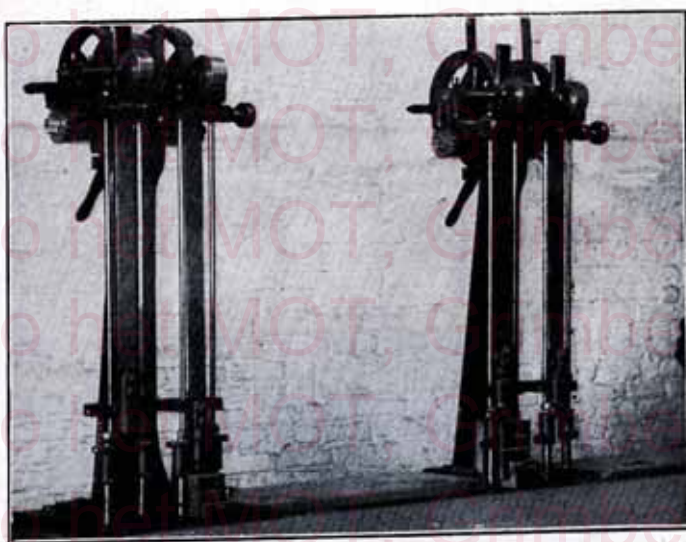
Les eaux usagées ou polluées sont généralement sans effet appréciable sur la prise, mais ne le sont pas toujours sur les autres propriétés des mortiers et bétons.

Consulter ci-après les « Règles pratiques d'emploi des mortiers et bétons » (n° 30).

II. — DURCISSEMENT ET RESISTANCES

7. — Au phénomène de solidification du ciment succède celui de son durcissement.

Les silicates de chaux, agents principaux de ce durcissement, con-



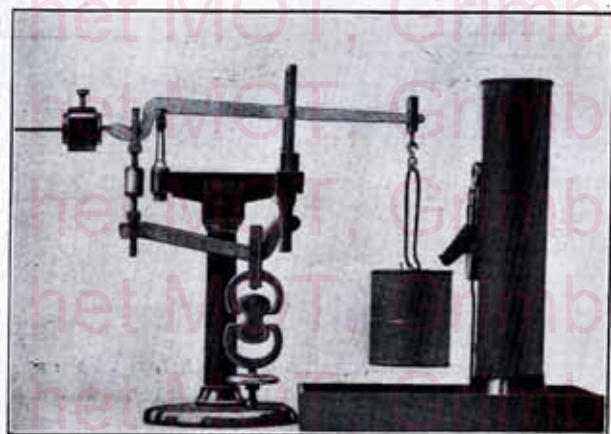
Pilonneuses des mortiers normaux pour l'essai de traction et de compression.

tinuent leur cristallisation et celle-ci se complique d'actions secondaires physico-chimiques encore mal définies, mais dont l'effet commun est de provoquer, avec le temps, un accroissement de durée des ciments et de leur résistance aux efforts mécaniques.

Cette augmentation de résistance, d'abord très rapide, continue à

s'opérer progressivement et de plus en plus lentement durant plusieurs années.

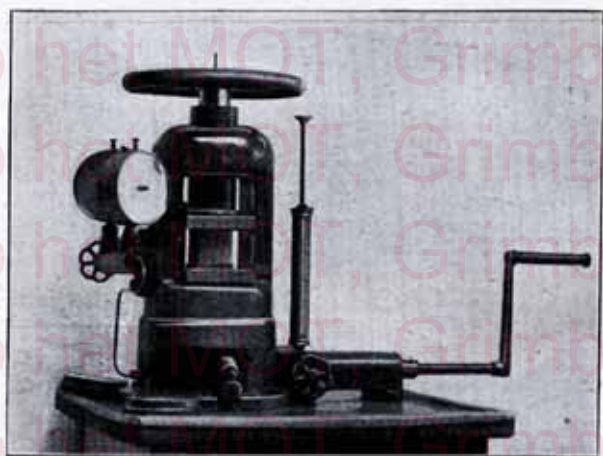
Les résistances qui en résultent pour les mortiers et bétons constituent la caractéristique primordiale des ciments. En effet, ce qu'on demande avant tout aux ciments, c'est de communiquer aux ouvrages



Balance de Michaelis pour la détermination de la résistance des mortiers à la traction.

en mortier ou en béton, la résistance — avec sécurité absolue — aux efforts auxquels ils sont soumis.

Pratiquement, dans les laboratoires, pour mesurer et comparer les allures de durcissement de différents ciments, on effectue, *sur mortier*, des essais de résistance à la traction et à la compression.



Presse de 50 tonnes pour la détermination de la résistance des mortiers à la compression.

Pour rendre possible et exacte cette comparaison, on opère sur un mortier normal, c'est-à-dire sur un mortier pour lequel la nature du sable et la grosseur de ses grains, le dosage en ciment et en eau, le mode de fabrication (battage à la machine), le mode et la durée de

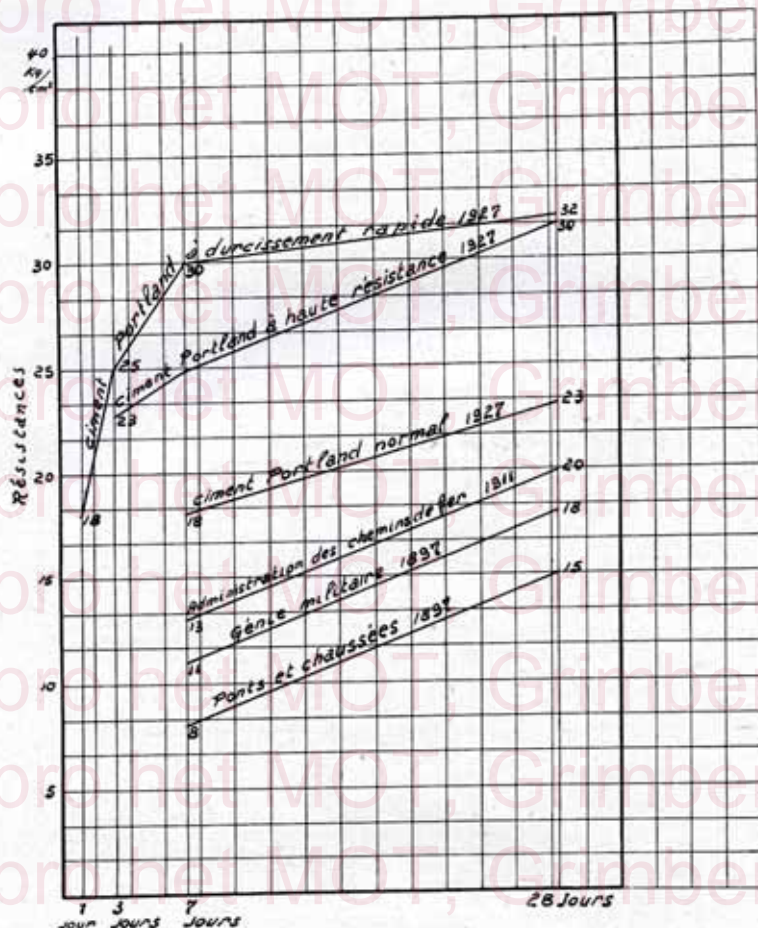


DIAGRAMME II.

Graphique de l'évolution des normes fixant les résistances minima des mortiers normaux battus à la traction.

conservation, en un mot tous les facteurs pouvant influencer les résultats en dehors de la qualité du ciment, sont maintenus parfaitement constants.

Avec un tel mortier, seule la qualité du ciment influe sur les chiffres de résistance obtenus.

RÉSISTANCES DES CEMENTS PORTLAND ARTIFICIELS FABRIQUÉS ACTUELLEMENT

8. — On ne peut mieux mettre en évidence les progrès énormes réalisés dans la fabrication des Portland artificiels au cours de ces dernières trente années environ, qu'en établissant le graphique des exigences successives des administrations publiques. Dans ce diagramme on peut comparer ces exigences entre elles et leur opposer les

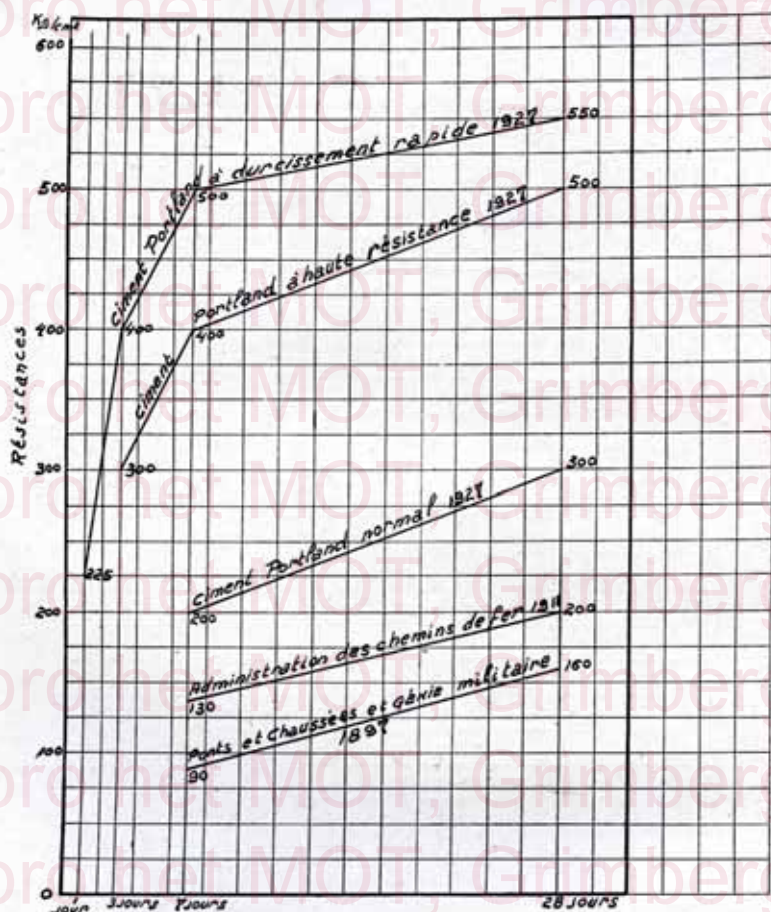


DIAGRAMME III.

Graphique de l'évolution des normes fixant les résistances minima des mortiers normaux battus à la compression.

conditions auxquelles se soumettent volontairement, à l'heure actuelle, les membres du Groupement Professionnel des Fabricants de Ciment Portland artificiel de Belgique.

Il est à remarquer que les résistances indiquées par ces diagrammes

ne traduisent pas la valeur moyenne des produits commerciaux, mais sont des *limites minima* en dessous desquelles les ciments sont refusés par les administrations comme étant de qualité insuffisante.

C'est dans le même esprit que les fabricants affiliés au Groupement Professionnel ont fixé la limite inférieure de qualité de leurs produits par des chiffres de résistances au-dessus desquels ils s'engagent à se maintenir.

Les résistances minima qu'ils s'imposent ainsi ne traduisent donc nullement la valeur moyenne de leurs ciments.

Celle-ci, comme l'exige la certitude de garantie, doit nécessairement être au-dessus de ce qu'indiquent les diagrammes II et III, et la tendance actuelle est de relever encore ces résistances. L'examen de ces diagrammes fait voir que la propriété capitale des superciments est d'acquérir de très hautes résistances en un temps excessivement court.

CAUSES DE MODIFICATION DANS L'ALLURE DU DURCISSEMENT ET DANS LES RÉSISTANCES

9. — Le phénomène du durcissement des ciments est soumis à l'action de facteurs analogues à ceux qui interviennent dans l'allure de la prise : quantité et nature de l'eau de gâchage, degré de sécheresse ou d'humidité et température du milieu où le durcissement s'effectue.

a) *Proportion d'eau de gâchage.*

La quantité d'eau de gâchage employée est d'importance capitale au point de vue des résistances des mortiers et des bétons. Il est nettement démontré à l'heure actuelle *qu'après la richesse en ciment, c'est la proportion d'eau employée qui a le plus d'action sur l'allure et le degré de durcissement.*

La quantité d'eau strictement nécessaire aux réactions de durcissement est faible et ne pourrait donner aux mortiers et bétons une plasticité suffisante pour leur mise en œuvre aisée et économique.

Pratiquement, c'est en vue d'obtenir cette plasticité qu'on règle la proportion d'eau (nos 53, 62, 63, 64).

C'est ici qu'il convient d'attirer l'attention des conducteurs et surveillants de chantiers sur le danger de gorger littéralement d'eau les mortiers et bétons et de sacrifier ainsi la qualité de résistance ultérieure à la plus grande facilité immédiate d'exécution.

Toute addition superflue d'eau réduit inutilement et considérablement les résistances, surtout dans les premières semaines qui suivent la mise en œuvre; en un mot, elle entrave fortement l'action de durcissement.

De ce point de vue, le diagramme V et surtout le diagramme IV

sont significatifs; ils montrent que la détermination de la proportion d'eau de gâchage des mortiers et surtout des bétons est d'importance primordiale et ne peut être laissée à la seule initiative d'un ouvrier peu averti.

L'insuffisance d'eau rend très difficile la pose des mortiers et des

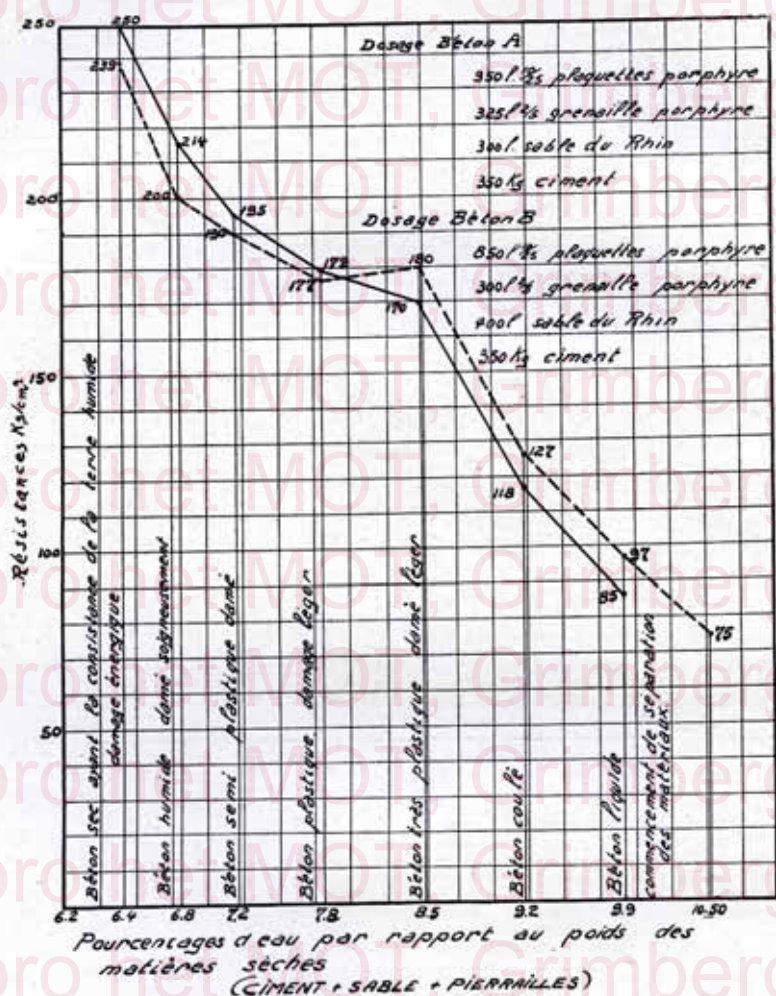


DIAGRAMME IV.

Variation de la résistance à la compression, à 7 jours, de deux bétons, en fonction de la proportion d'eau de gâchage.

bétons, dont les éléments trop secs ne parviennent pas à s'enchâsser et donnent des ouvrages poreux, manquant de compacité; elle peut même entraver l'action du durcissement et compromettre gravement la résistance des constructions.

Des températures élevées, une sécheresse trop grande, une action solaire intense, provoquent, surtout à la surface des ouvrages, une évaporation rapide et par conséquent, une pénurie d'eau, d'où résulte la formation d'une croûte, plus ou moins profonde, dépourvue de toute solidité.

Les parties exposées doivent donc être établies et entretenues dans

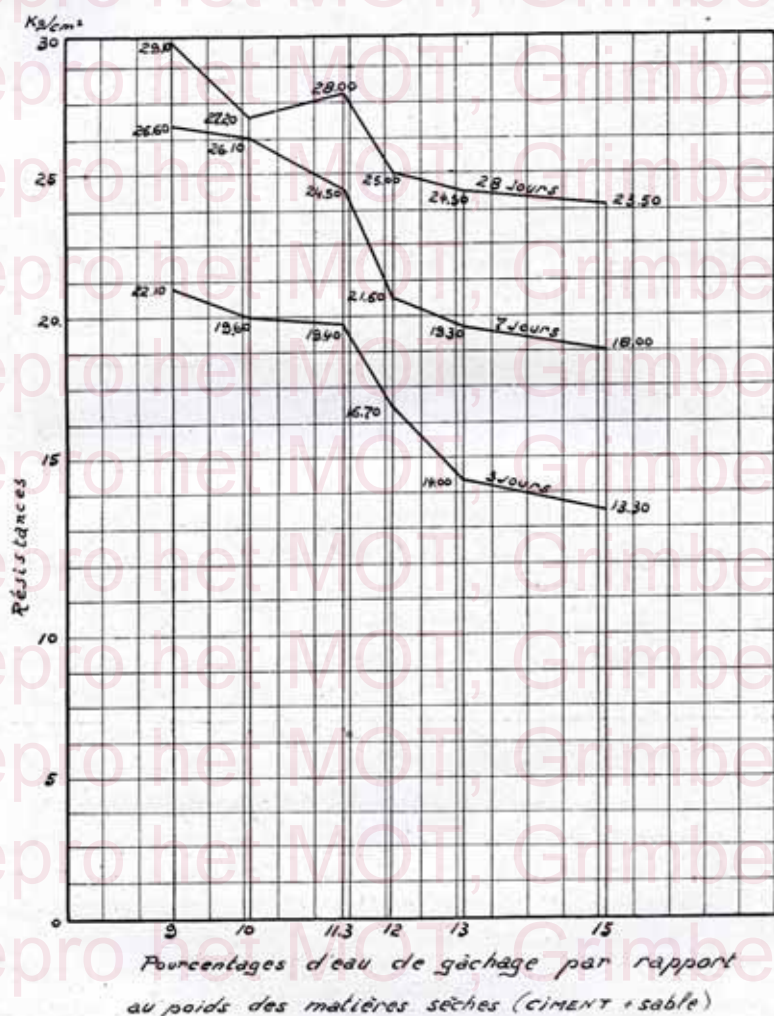


DIAGRAMME V.

Variation de la résistance d'un mortier à la traction, à 3, 7 et 28 jours, en fonction de la quantité d'eau de gâchage.

un état suffisant d'humidité pendant une période de deux à quatre semaines, suivant le degré d'activité du ciment et les conditions du milieu ambiant.

Les matériaux avides d'eau qui entrent dans la constitution des bétons et des maçonneries, tels briques, briquillons, cendrées, etc., doivent être entièrement gorgés d'eau immédiatement avant leur mise en œuvre. Employés secs, ils auraient tôt fait d'absorber l'eau du mortier qui les enrobe et d'enlever ainsi, sur l'étendue de leurs surfaces de contact, l'adhérence et la résistance indispensables à la cohésion de l'ouvrage.

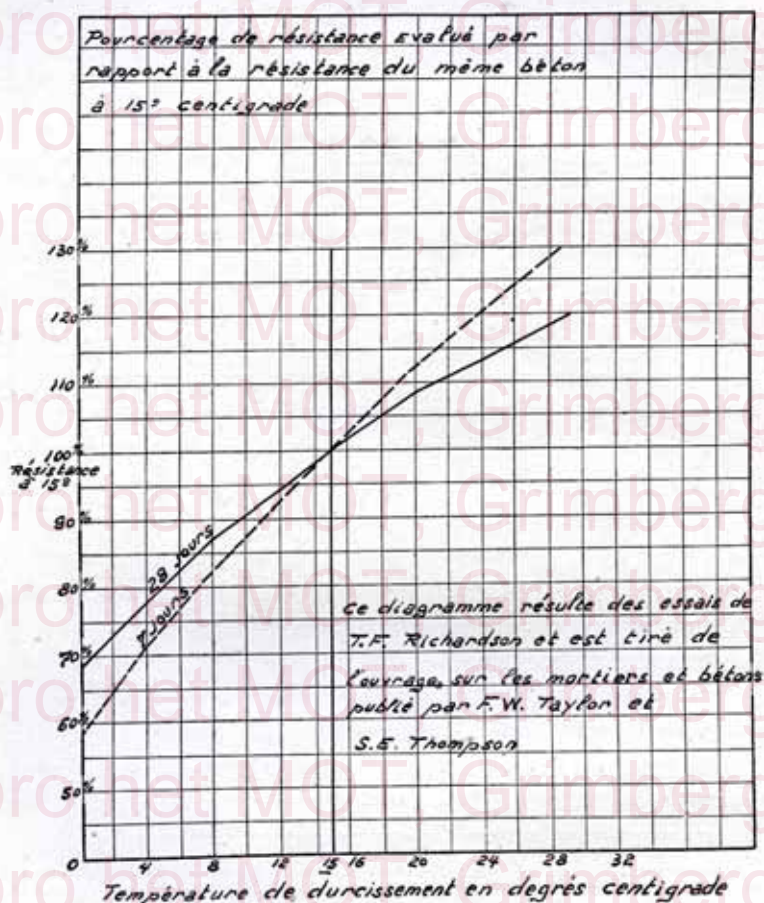


DIAGRAMME VI.

Influence de la température sur la résistance d'un même béton.

b) Température — Gelée.

L'élévation de température accélère le durcissement, son abaissement le ralentit.

La gelée ainsi qu'il a été signalé, entrave non seulement la prise, mais également le durcissement du ciment.

Les moyens dont on dispose pour combattre cet effet dans les mortiers et bétons sont :

- L'augmentation de richesse en ciment ;
- La réduction de la proportion d'eau de gâchage ;
- Le réchauffement des matières et notamment de l'eau ;
- La protection des ouvrages contre le froid.

c) *Influence des sels contenus dans l'eau de gâchage.*

Les résistances sont diminuées :

- Par l'addition de sel marin ;
- Par l'emploi d'eau de mer.

Elles sont accrues notamment :

- Par l'addition de chlorure de calcium dans certaines limites de proportions.

Pour indications sur ces proportions et sur l'utilisation des eaux impures, consulter les « Règles pratiques d'emploi des mortiers et bétons » (n^{os} 30, 66).

III. — STABILITE OU NON EXPANSION DU CIMENT

10. — Il faut entendre par là que le ciment et les ouvrages qu'il sert à édifier, accentuent ou tout au moins gardent avec certitude, au cours de leur période de durcissement, puis au cours de leurs longues années d'existence, leurs propriétés de cohésion ainsi que de résistance aux efforts mécaniques et aux agents physiques.

Ce qui signifie que, dans de bonnes conditions de mise en œuvre et de durcissement, les mortiers et les bétons doivent accroître régulièrement leurs résistances avec l'âge, et ne peuvent ressentir les effets d'aucun travail interne de dislocation et de destruction qui serait dû à la constitution propre du ciment.

La stabilité est donc une propriété essentielle des ciments, indispensable à la bonne conservation des ouvrages.

On connaît les matières qui sont susceptibles de provoquer, soit par foisonnement ou cristallisation avec augmentation de volume, soit par des réactions chimiques postérieures à la prise, soit par les deux causes à la fois, le gonflement et la décomposition des ciments.

En ordre principal ce sont : la chaux vive, la magnésie en excès, les sulfates (le plâtre par exemple).

Les sulfates — de calcium ou de magnésium qui sont le plus couramment rencontrés — réagissent sur la chaux et l'alumine du ciment et provoquent un gonflement si désastreux, que le composé provenant de ces réactions a été appelé « bacille du ciment ».

Les fabricants disposent dans leurs laboratoires d'usine, de moyens très simples permettant d'éprouver rapidement la stabilité de leurs produits. C'est surtout l'essai de durcissement accéléré à l'eau bouillante qui s'est avéré le contrôle le plus sûr de la stabilité. Sous l'action d'un tel traitement, les manifestations de gonflement, de boursofflement et de craquelures se montrent au bout de quelques heures si le ciment est expansif.

Les Portland artificiels fabriqués avec soin présentent toutes les garanties d'une parfaite stabilité. Le choix judicieux des matières premières, la finesse, l'homogénéité et le contrôle des mélanges, la bonne cuisson, la grande finesse de mouture des clinkers, bref les progrès de la fabrication et les contrôles continus dont elle est l'objet sont tels qu'ils assurent la stabilité des ciments. De longues années d'expérience en sont la preuve : la bonne renommée de longévité des ouvrages en béton et en béton armé n'est plus à faire.

REMARQUES PRATIQUES

11. — Encore faut-il garder au ciment Portland ce caractère de stabilité en évitant les malfaçons et les fautes grossières imputables à un manque de surveillance ou même à l'ignorance de ceux qui en font usage.

Il convient de veiller notamment à ce qu'il ne s'introduise dans les mortiers et bétons aucun débris de plâtre. Les briques ou pierres provenant de démolitions doivent être soigneusement débarrassées de tout plâtre avant leur réemploi à des travaux de maçonnerie ou à l'exécution de béton de briquillons, si l'on veut éviter l'action expansive de cette matière sur le ciment. Il faut proscrire également l'addition de chaux vive ou de chaux hydraulique imparfaitement éteinte.

L'emploi de l'eau de mer, qui contient notamment du sulfate de magnésie en dissolution, n'est pas à proscrire absolument pour le gâchage des mortiers et bétons ; les sels qu'elle contient sont en proportions insuffisantes pour mettre en danger la stabilité du ciment. Il en est de même pour toute eau d'autre provenance mais légèrement sulfatée (n° 30).

Néanmoins l'emploi d'eau douce, exempte de sulfates, est toujours préférable.

TRAVAUX A LA MER

12. — Les ouvrages en mortier et en béton de ciment qui sont au contact permanent de l'eau de mer ou, en général, des eaux sulfatées, se trouvent dans des conditions de conservation moins favorables : ils

sont exposés à une destruction plus ou moins rapide si l'on ne prend pas soin de leur appliquer des mesures de précaution spéciales.

Outre l'hydratation et la cristallisation des silicates et des aluminates de chaux, il se produit, au cours de la prise et du durcissement des ciments, des réactions secondaires mettant en liberté de la chaux éteinte ($\text{Ca}(\text{OH})_2$).

La chaux se dissout facilement dans l'eau, surtout dans l'eau courante. Cette dissolution est encore facilitée dans l'eau de mer par la présence de chlorure de magnésium, et est en outre accélérée par l'action mécanique des vagues.

Sous cette attaque combinée, les mortiers et bétons peuvent devenir poreux, perméables, ce qui ouvrirait des voies d'accès de plus en plus nombreuses et de plus en plus larges à l'eau de mer. L'ennemi étant ainsi dans la place, y déposerait et y concentrerait son sulfate de magnésie qui, au contact des aluminates de chaux, donnerait naissance au « bacille » destructeur du ciment. Son œuvre se propagerait de proche en proche jusqu'au cœur même du béton, et la ruine de l'ouvrage pourrait en être la conséquence.

Mais il convient de ne pas exagérer ce danger; en effet, *que de travaux, murs de quai, bassins, écluses, pilots, etc., ont été construits à la mer il y a de nombreuses années et résistent victorieusement à l'épreuve.*

Il n'est donc pas douteux que le ciment Portland artificiel convient pour élever à la mer des travaux durables. Il est notoirement reconnu que la plupart des cas d'insuccès à la mer sont dus à de mauvaises conditions d'emploi.

L'expérience enseigne un certain nombre de *conditions qu'il faut observer dans l'exécution de travaux à la mer.*

Elles ont toutes pour but final de protéger les ouvrages contre la pénétration et l'action possible de l'eau de mer, et se résument comme suit :

— Faire usage de mortiers ou de bétons riches, compacts, imperméables.

Les bétons doivent, en outre, être parfaitement damés sans excès d'eau.

— Fixer la chaux mise en liberté, par l'addition au ciment de matières pouzzolaniques, c'est-à-dire contenant notamment de la silice à l'état chimiquement libre, apte à se combiner avec la chaux libérée.

Ce sont, par exemple, les trass finement moulus, l'argile Kaolinique deshydratée et pulvérisée, certains laitiers de hauts fournaux. Outre leur action chimique sur la chaux, dont elles s'emparent, ces matières fines aident à former un béton gras, imperméable et facile à damer.

— Créer une couche de surface extérieure imperméable et protectrice, par l'emploi de coffrages bien lisses, ou par lissage après décoffrage. A cette même fin, on recommande spécialement de laisser durcir le plus longtemps possible le béton à l'air avant de l'immerger dans l'eau de mer : l'acide carbonique de l'air carbonate la chaux et donne surface imperméable et très peu soluble.

— Eviter ou soigner particulièrement les joints de reprise, dont les imperfections sont des voies toutes préparées à l'accès de l'eau de mer.

Pour indications complémentaires, voir ci-après les « règles pratiques de mise en œuvre des mortiers et des bétons » (n° 65).

IV. — VARIATIONS DE VOLUME — DILATATION CONTRACTION — GONFLEMENT — RETRAIT

13. — Il ne s'agit pas ici du gonflement par expansion et de la destruction de la cohésion du ciment dont il a été question à propos de la propriété de stabilité.

Les variations de volume envisagées n'ont pas les mêmes causes et n'ont pas d'action destructive sur les constituants du ciment; elles n'ont d'autre effet que de provoquer *physiquement* des modifications de dimensions dans les pièces et les ouvrages en ciment pur, en mortier ou en béton.

On les attribue en tout premier lieu au phénomène de durcissement du ciment et on peut leur rattacher par analogie les changements de volume provoqués par les variations de température et surtout par les alternatives de sécheresse et d'humidité auxquelles la plupart des ouvrages sont exposés.

GONFLEMENT ET RETRAIT DE DURCISSEMENT

14. — La pâte de ciment pur en durcissant à l'air sec subit une contraction importante de l'ordre de 0.001 de ses dimensions linéaires. Si, au contraire, le durcissement s'opère sous eau, c'est un gonflement qui se produit.

L'explication de ces phénomènes, sans être complètement démontrée ni admise par tout le monde, semble se trouver dans le passage des constituants du ciment à deux états physiques différents :

Le premier *cristallin*, résultant de la cristallisation des aluminates et silicates de chaux ainsi que de la chaux elle-même, libérée par les composés précédents;

Le second *colloïdal*, provenant des réaction secondaires déjà signalées, et formé notamment de silice à l'état gélatineux.

Ce sont précisément ces colloïdes enrobant les cristalloïdes qui prendraient du gonflement à l'eau et du retrait à l'air sec, accentuant naturellement leurs effets à mesure que le durcissement progresse.

Ce qui n'est pas discuté, c'est que le phénomène existe et qu'il donne lieu à des constatations fâcheuses si l'on ne prend des précautions spéciales.

Dans les travaux durcissant à l'air, la dessiccation des mortiers et bétons est dégressive depuis les parties exposées directement à l'air jusque vers l'intérieur de la masse. Elle produit simultanément un retrait

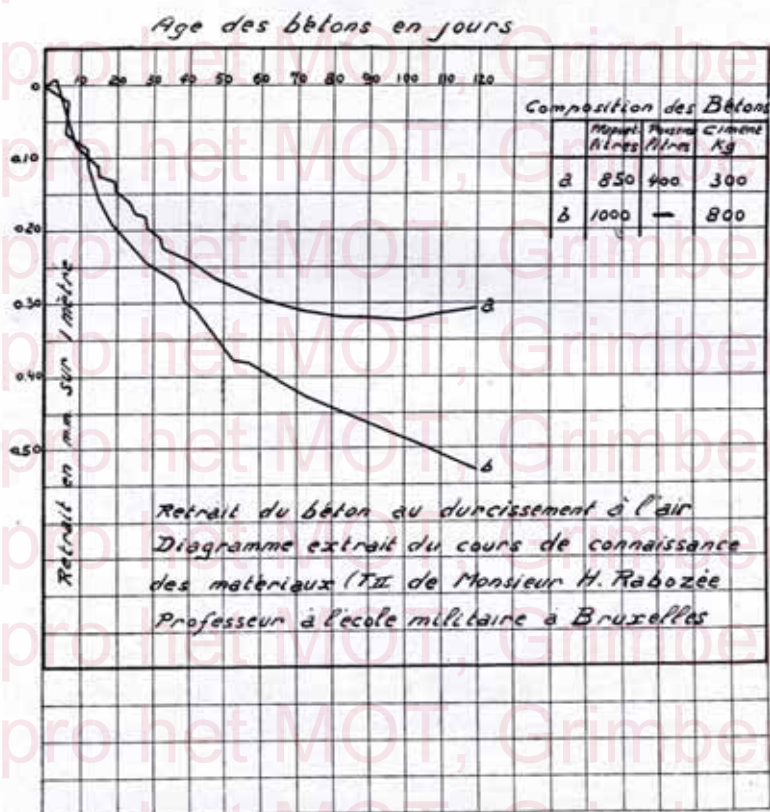


DIAGRAMME VII.

Variation du retrait des bétons à l'air en raison de leur richesse en ciment.

en surface et un gonflement au cœur des pièces, ce qui provoque le fendillement des couches et enduits de surface, leur donne un aspect très désagréable et, enfin, présente l'inconvénient de réduire l'imperméabilité.

Outre cette inégale dessiccation en profondeur il peut même se produire, si l'on ne prend des précautions spéciales, un retrait amenant

des fissurations dans toute pièce durcissant à l'air et assujettie en deux ou plusieurs points fixes. C'est le cas pour des ouvrages en béton armé, pour des dalles de grande surface encastrées sur leur pourtour, pour des murs de grande longueur encastrés dans leurs fondations, pour des

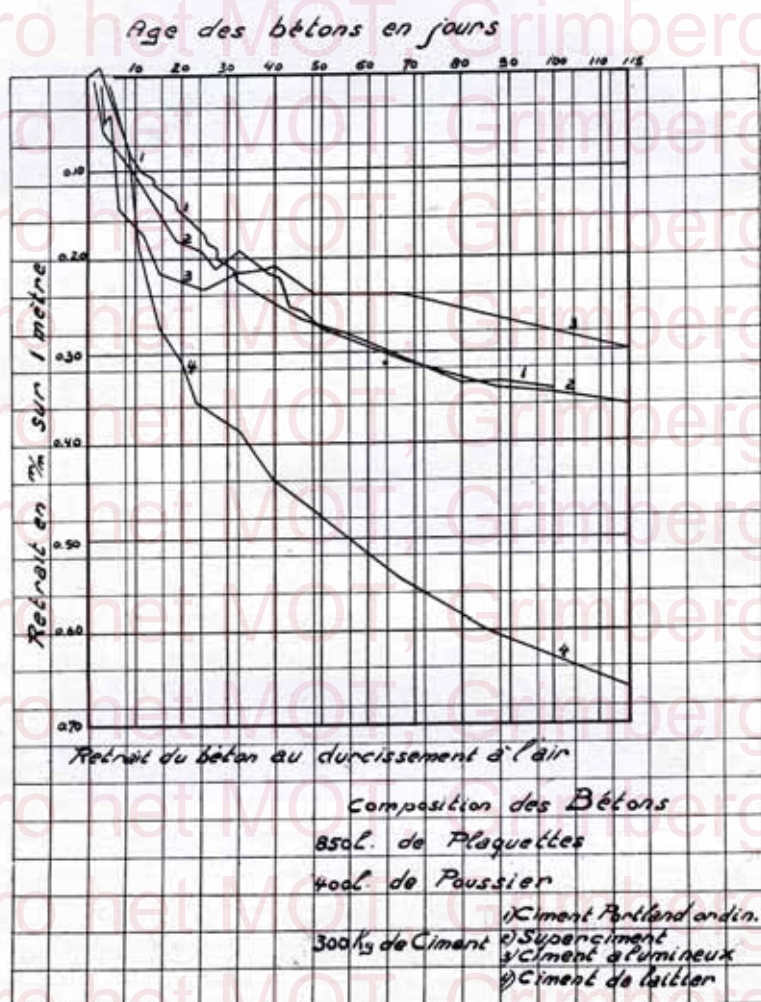


DIAGRAMME VIII.

Variation du retrait des bétons à l'air en fonction de la nature du ciment.

Essais effectués au laboratoire d'Essai des Matériaux de l'Ecole Militaire, à Bruxelles.

revêtements de routes en frottement et en épaulement sur leur base, etc. ; dans ces conditions les pièces ne peuvent obéir aux efforts de rétrécissement qui les sollicitent et se fissurent.

Ces effets de retrait à l'air sont naturellement d'autant moins mar-

qués que les mortiers et bétons sont moins riches en ciment et sont mis en œuvre avec moins d'eau.

Les remèdes à appliquer sont les suivants :

- La bonne exécution des enduits et des bétons ;
- La réduction de la richesse en ciment dans les limites compatibles avec la stabilité et l'imperméabilité de l'ouvrage ;
- L'humidification des surfaces pendant les premières semaines du durcissement ;
- La réduction de la longueur des pièces par la création de joints préventifs, en vue de permettre, en ces endroits, le jeu des dilatations et des contractions.

VARIATIONS DE VOLUME DUES AUX ALTERNATIVES DE SÉCHERESSE ET D'HUMIDITÉ

15. — Comme dans tous les matériaux pierreux, les alternatives de sécheresse et d'humidité produisent, dans les mortiers et bétons, des

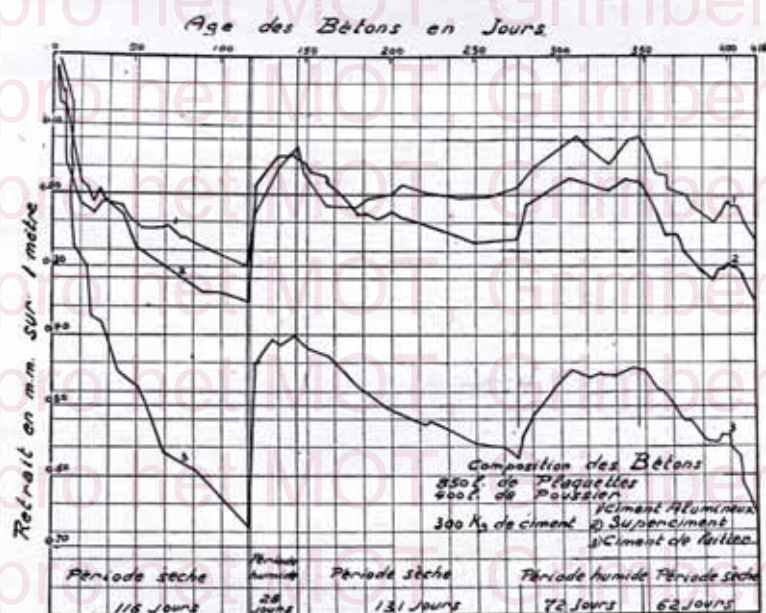


DIAGRAMME IX.

Contractions et gonflements des bétons exposés alternativement à la sécheresse et à l'humidité.

Essais effectués au Laboratoire d'Essai des matériaux de l'École Militaire.

modifications de volume dont les effets, quoique moindres, peuvent se rapprocher de ceux du gonflement et du retrait de durcissement.

Le ciment n'est pas étranger à ce phénomène, et son action

s'explique si l'on admet la formation de colloïdes au cours du durcissement.

Même après le durcissement du ciment, ces colloïdes resteraient sujets à gonflement ou à retrait suivant leur degré d'humidité; ils renforceraient ainsi la sensibilité des mortiers et bétons aux effets alternatifs de sécheresse et d'humidité. Le diagramme IX semble cependant prouver que cette sensibilité s'atténue avec l'âge du béton.

La compacité des pièces et l'imperméabilisation de leurs surfaces contrarient fortement cette action.

VARIATIONS DE TEMPÉRATURE

16. — Les bétons et mortiers subissent également des allongements et des contractions par suite des variations de température.

Le coefficient de dilatation des bétons en fonction de la température est du même ordre de grandeur que celui de l'acier. Cette coïncidence est heureuse pour la bonne adhérence des armatures au cours des déformations du béton armé.

17. — Remarque.

Les joints prévus pour empêcher la formation des fissures par l'effet du retrait de durcissement, sont également nécessaires et favorables au jeu des variations de dimensions des bétons sous l'action de la température et, pour les travaux exposés aux intempéries, sous l'action des alternatives de sécheresse et d'humidité (n° 67).

V. — FINESSE DE MOUTURE

18. — Les qualités d'un ciment de composition donnée s'accroissent avec la finesse de sa mouture.

Cette influence se marque à la fois :

1° Sur l'activité du durcissement, c'est-à-dire sur les résistances;

2° Sur la stabilité.

La finesse de mouture agit donc favorablement sur les deux caractéristiques primordiales du ciment, puisqu'elle le prémunit davantage contre tout danger d'expansion et qu'elle lui donne des résistances plus élevées en un temps plus court.

Il est, en effet, reconnu depuis longtemps que c'est la poussière « impalpable » du ciment qui est la plus active, tandis qu'au-dessus d'une certaine dimension, les mortiers confectionnés au moyen de grains n'offrent plus guère de résistance, ainsi que le montre le tableau ci-après.

CHARGES DE RUPTURE A LA TRACTION (t) ET A LA COMPRESSION (c)
DE MORTIERS NORMAUX BATTUS
COMPOSÉS AU MOYEN DE CIMENTS DE FINESSES DIFFÉRENTES (1)

GROSSEURS ET PROPORTIONS DES GRAINS DU CIMENT.	à 3 jours Kg/cm ²		à 7 jours Kg/cm ²		à 28 j. Kg/cm ²
	t.	c.	t.	c.	t.
Grains restés sur le tamis de 4900 mailles par cm ² . 100 %; dimensions des grains > 0,1 m/m.	< 4	56	7,40	102	13,40
Grains passés au tamis de 4900 mailles par cm ² . 100 %; dimensions des grains < 0,1 m/m.	28,10	403	31,60	500	34,00
Grains restés sur le tamis de 4900 mailles 20 %; grains passés au tamis de 4900 mailles 80 %.	20,75	360	27,45	400	31,30

La finesse de mouture des ciments s'évalue et se contrôle à l'aide de tamis à mailles carrées extrêmement serrées, dont les deux principaux types en usage comportent :

900 mailles par centimètre carré, ce qui correspond, pour les diamètres de fils généralement admis, à des dimensions de grains approximatives de 0.22 m/m.

4,900 mailles par centimètre carré, ce qui correspond, pour les diamètres de fils généralement admis, à des dimensions de grains approximatives de 0.10 m/m.

Etant donnée la finesse actuelle de certains ciments, il est même question d'utiliser des tamis de 10,000 mailles par centimètre carré, retenant les grains de 0.065 à 0.070 m/m.

Les perfectionnements apportés aux appareils de mouture ont certainement contribué aux magnifiques progrès réalisés par l'industrie du ciment.

Les conditions de finesse exigées actuellement par les consommateurs sont de plus en plus sévères et c'est à juste titre que les fabricants affiliés au Groupement Professionnel s'imposent volontairement des conditions très rigoureuses ainsi que le montre le diagramme de comparaison ci-après.

(1) Les résistances consignées dans ce tableau ont été obtenues au Laboratoire d'essai des matériaux de l'École militaire à Bruxelles.

La rapidité de prise du ciment augmente aussi avec la finesse de mouture; mais une bonne fabrication, un léger arrosage (éventuel) des clinkers, une addition convenable de gypse, maintiennent, sans danger pour les autres propriétés du ciment Portland, une prise lente ne don-

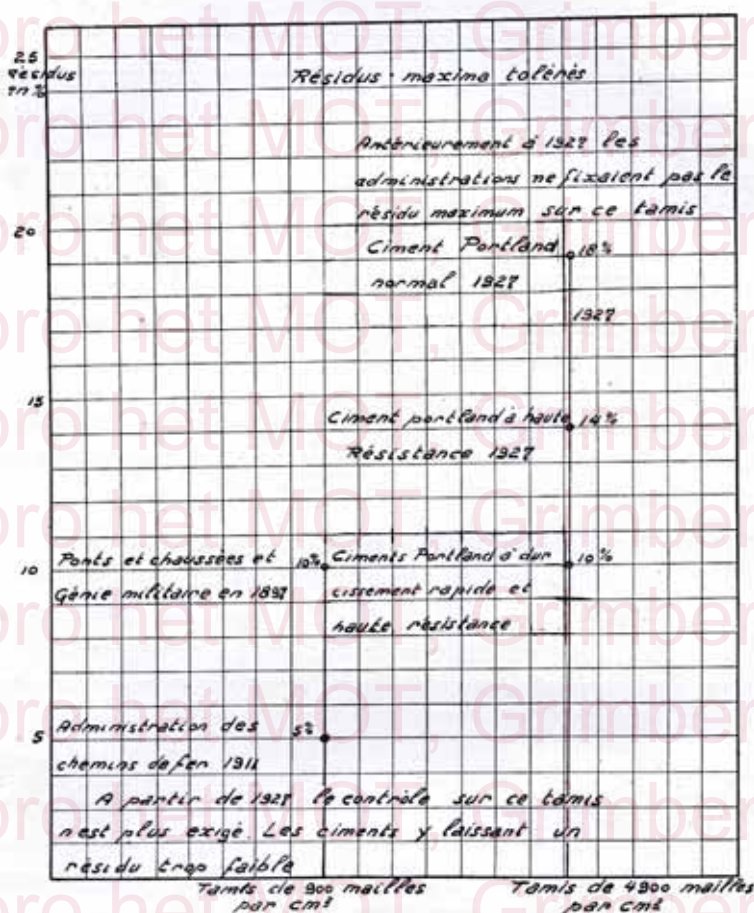


DIAGRAMME X.

Graphique de l'évolution des normes fixant la finesse minimum des ciments Portland.

nant lieu à aucune difficulté pour la mise en œuvre des mortiers et bétons.

VI. — MATIÈRES D'ADDITION AU CIMENT.

19. — Le Ciment Portland artificiel ne comporte aucune addition de matière, si ce n'est celle de gypse en proportion strictement nécessaire pour régulariser la prise.

Il paraît utile d'attirer l'attention sur la composition d'un certain nombre de produits de mélange, dont l'appellation commerciale comporte le nom de « Portland » parce qu'ils contiennent une certaine proportion de ciment Portland ; la matière additionnée est généralement du laitier granulé de haut fourneau.

CIMENT PORTLAND DE FER

Formé d'un mélange intime de 70 p. c. de clinker de ciment Portland broyé avec 30 p. c. de laitier granulé.

CIMENT PORTLAND DE LAITIER OU CIMENT DE HAUT FOURNEAU

Composé d'un mélange intime de 15 à 30 p. c. de clinker de ciment Portland broyé avec 85 à 70 p. c. de laitier granulé.

Le ciment Portland qui entre dans ces composés résulte lui-même d'un mélange de laitier basique et de chaux, finement pulvérisé et soumis à la cuisson jusqu'à clinkérisation ; le clinker ainsi obtenu est additionné des pourcentages de laitier indiqués ci-avant, puis moulu à grande finesse.

La variabilité de composition des laitiers permet difficilement une fabrication de grande régularité.

CIMENT DE LAITIER

Ce produit ne doit pas être confondu avec les précédents. Il ne peut porter le nom de « ciment Portland » dont il n'a pas les propriétés de stabilité ni de résistance. Son emploi est moins étendu et ne convient que pour des travaux de fondation ou à l'abri de l'air.

Le ciment de laitier se compose de laitier granulé de haut fourneau et de chaux, hydraulique ou non, mais parfaitement éteinte. Ce mélange, exécuté à froid, c'est-à-dire sans cuisson, est simplement rendu intime par une mouture très fine.

Un tel produit n'est donc pas comparable au ciment Portland artificiel.

Garantie de qualité des Ciments Portland artificiels
sortant des usines affiliées au «Groupement professionnel
des fabricants de Ciment Portland artificiel
de Belgique».

20. — Les fabricants affiliés *garantissent la qualité de leurs ciments et se soumettent au contrôle du service de recherches du Groupement Professionnel établi dans les laboratoires de l'Université Libre de Bruxelles.*

En effet, toutes les usines affiliées ont pris l'engagement suivant :

« a) Chaque fabricant fournira son ciment exclusivement sous
« l'une de ses marques de fabrique déposées ;

« b) Chaque fourniture sera accompagnée d'un certificat délivré
« par l'usine productrice, garantissant que le ciment satisfait soit aux
« conditions du cahier des charges régissant les travaux auxquels il est
« employé, soit à la spécification du pays de destination ;

« c) Chaque fabricant insérera dans ses conditions générales de
« vente une clause disant qu'il se soumet au contrôle du Laboratoire
« officiel du Groupement Professionnel. Ce laboratoire pourra, soit de
« sa propre initiative, soit à la demande du fabricant ou de l'acheteur,
« faire un contrôle du ciment. »



Marque de contrôle.

Une marque de contrôle spéciale, indépendante des marques de fabrique propres aux usines, fait connaître à tout acheteur que le fabricant est membre du Groupement Professionnel et que la qualité du ciment est garantie.

Sauf stipulations particulières imposées par les administrations ou par l'acheteur, les Ciments Portland artificiels des membres du Groupement répondent en toute garantie aux caractéristiques ci-dessous, suivant la catégorie à laquelle ils appartiennent :

Ciment Portland artificiel normal (P. A. N.) ;

Ciment Portland artificiel à haute résistance (P. A. H. R.) ;

Ciment Portland artificiel à durcissement rapide (P. A. D. R.).

1. — CARACTÉRISTIQUES COMMUNES AUX TROIS CATÉGORIES DE CIMENT

a) *Composition chimique.* — Le ciment ne peut contenir plus de 3 p. c. de SO_3 ni plus de 3 p. c. de MgO .

Les essais relatifs aux contenances en SO_3 et MgO ne s'effectuent que dans le cas où ils sont spécialement exigés ou dans le cas où une analyse chimique du ciment est demandée.

b) *Poids spécifique.* — Le poids spécifique ne peut descendre au-dessous de 3.05.

c) *Prise.* — La prise ne peut commencer avant quarante-cinq minutes ; elle doit être terminée dans un délai compris entre trois et douze heures.

d) *Stabilité.* — Cet essai s'effectue à l'aide de l'appareil Le Chatelier.

L'augmentation de l'écartement des aiguilles à froid ne pourra dépasser 6 m/m ; l'augmentation de l'écartement des aiguilles au cours de l'essai à chaud ne pourra dépasser 6 m/m ; l'augmentation totale de l'écartement des aiguilles ne pourra dépasser 10 m/m.

2. — CARACTÉRISTIQUES PROPRES A CHAQUE CATÉGORIE DE CIMENT

a) *Finesse de mouture.*

La finesse de mouture se détermine à l'aide du tamis de 4,900 mailles par centimètre carré.

Les résidus maxima tolérés pour les trois catégories de ciment sont les suivants :

Ciment P. A. normal 18 p. c.

Ciment P. A. à haute résistance 14 p. c.

Ciment P. A. à durcissement rapide 10 p. c.

b) *Résistances des mortiers normaux battus à la traction
et à la compression.*

Les résistances ne pourront être inférieures aux chiffres suivants
(voir diagrammes : II et III) :

DÉSIGNATION DU CIMENT.	NATURE DE L'ESSAI.	RÉSISTANCES EN Kg/Cm ²			
		1 jour à l'air	3 jours : 1 jour à l'air humide et 2 jours sous eau.	7 jours : 1 jour à l'air humide et 6 jours sous eau.	28 jours : 1 jour à l'air humide et 27 jours sous eau.
Ciment P. A. normal.	Traction	—	—	18	23
	Compression	—	—	200	300
Ciment P. A. à haute résistance.	Traction	—	23	25	30
	Compression	—	300	400	500
Ciment P. A. à durcis- sement rapide.	Traction	20	25	30	32
	Compression	225	400	500	550

LABORATOIRE DES MATÉRIAUX

DE

L'UNIVERSITÉ LIBRE DE BRUXELLES

dans lequel le Service de Recherches et de Contrôle

du Groupement Professionnel des Fabricants de

Ciment Portland artificiel de Belgique a été autorisé

à poursuivre ses études et travaux.



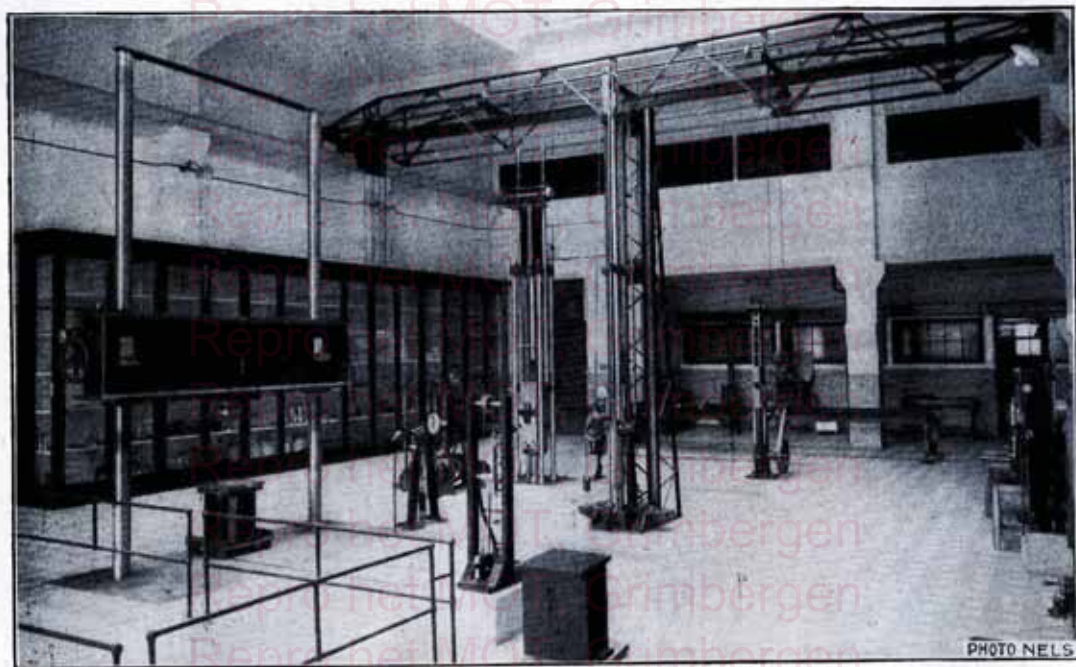
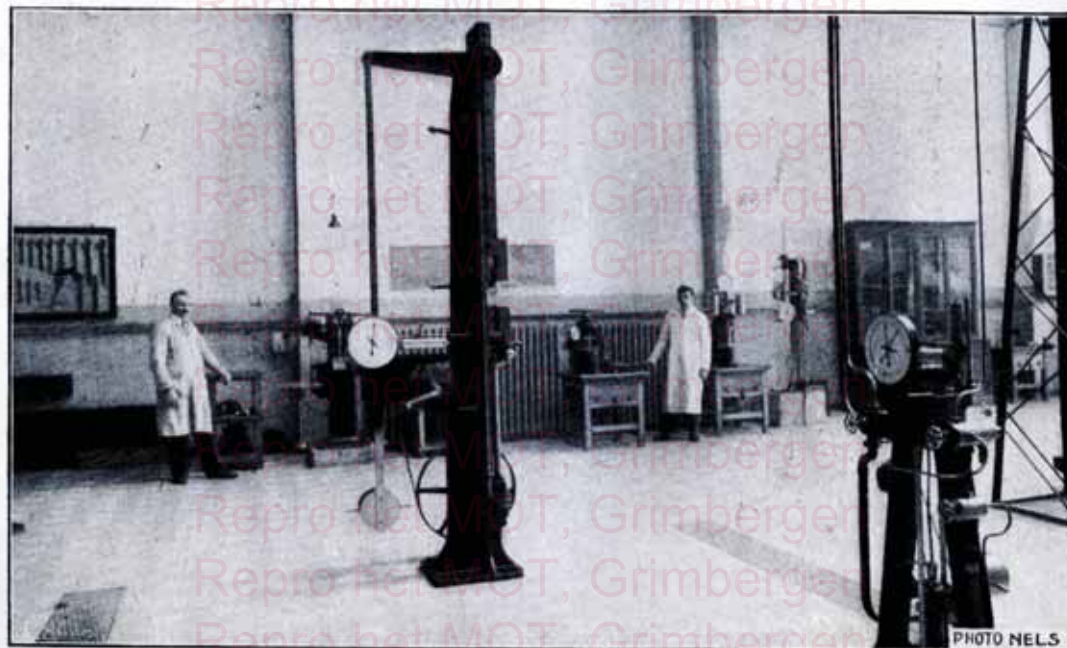


PHOTO NELS

Salle des machines d'essai.



Autre vue de la salle des machines d'essai.

DEUXIÈME PARTIE

Règles d'emploi du ciment dans les mortiers et les bétons.

I. — Choix, préparation, conservation des matériaux
entrant dans la constitution des mortiers et bétons.

CONSERVATION DU CIMENT

21. — Quelle que soit la valeur d'un ciment à sa sortie de l'usine, la conservation de ses qualités dépend, avant tout, des soins dont il a été l'objet au cours du transport et lors de son emmagasinage.

Les ciments sont généralement fournis en sacs, emballage commode pour la manutention, mais qui ne protège pas son contenu contre la pluie ni contre l'humidité de l'air (1).

Le ciment est avide d'eau : toute trace d'humidité qui le pénètre provoque sa prise partielle. Ce sont les poussières les plus fines qui sont atteintes d'abord ; leur prise prématurée se poursuit progressivement et le ciment se trouve ainsi dépouillé de ses éléments les plus actifs. Sous l'action lente et continue de l'humidité, ces parties fines s'agglomèrent en grumeaux qui augmentent de volume et de dureté.

Tant que les grumeaux se laissent encore écraser et malaxer, on peut être tenté d'utiliser un tel ciment ; pourtant son aptitude au durcissement est réduite et les résistances peuvent en être très affaiblies et devenir insuffisantes, au point d'en rendre l'usage dangereux.

Les précautions à prendre pour la bonne conservation des ciments sont élémentaires.

(1) Certaines usines doublent leurs sacs d'une enveloppe intérieure en papier. C'est là un notable progrès.



Carrières de porphyre de Quenast. Vue générale de l'une des carrières (Reproduction interdite).
Cliché obligeamment prêté par « La Technique des Travaux ».

Au cours du transport, on les couvrira de toiles imperméables.

Sur les chantiers, où l'emmagasinage est parfois d'assez longue durée, les sacs de ciment seront disposés dans des hangars construits soit en agglomérés, soit en bois. Portes et fenêtres doivent fermer hermétiquement, surtout si elles sont orientées vers les vents pluvieux.

Les parois en bois seront doubles de préférence; si elles sont simples, on aura recours à des planches languettées ou dont les joints sont recouverts de lattes. Il est bon de revêtir les parois intérieures de papier fort, goudronné ou imperméabilisé.

Le plancher ne peut jamais poser directement sur le sol; il doit être surhaussé de façon à laisser au-dessous un espace libre largement aéré.

Dans de bonnes conditions d'emmagasinage, le ciment Portland artificiel peut se conserver de nombreuses années sans rien perdre de ses qualités.

Des essais ont montré qu'après six ans, de tels ciments n'avaient manifesté aucune diminution dans leurs résistances.

Les ciments Portland de fer se conservent beaucoup moins bien. Quant aux ciments de laitier, ils perdent jusqu'à 50 p. c. de leurs résistances après trois ans d'emmagasinage dans les mêmes conditions.

SABLES

Pour la clarté des indications qui vont suivre, il est nécessaire de donner quelques définitions concernant la nature des sables et leur composition granulométrique (grosseurs et proportions des diverses grosseurs des grains qui les constituent).

NATURE DES SABLES.

22. — Les sables peuvent être naturels ou artificiels.

SABLES NATURELS :

Sables de rivière : dragués dans le fond de cours d'eau.

Les principaux en usage en Belgique sont : les sables du Rhin, de la Meuse, parfois de l'Ourthe.

Sables de mer : enlevés des plages et des dunes du littoral.

Sables de carrières : déposés aux époques géologiques.

Ils sont très abondants dans notre pays, tels les sables de Campine, des environs de Bruxelles (Uccle, Mont-Saint-Guibert, Braine-le-Comte, etc.), de la vallée de la Haine, des environs d'Aix-la-Chapelle, etc.



L'un des multiples sièges d'exploitation dépendant du Syndicat des carrières de porphyre de Lessines.

Tous ces sables sont siliceux; ils peuvent être très purs ou contenir des proportions plus ou moins importantes d'argile, de glauconie, de calcaire, etc. La forme des grains est variable. Elle va de la forme anguleuse jusqu'à la forme plus ou moins arrondie.

SABLES ARTIFICIELS

Les sables artificiels sont les produits du concassage et du broyage de pierres naturelles dures. On les appelle *poussiers*.

On distingue surtout les poussiers de porphyre, de granit, de quartzite, de grès, de calcaire dur.

Les meilleurs sont ceux qui proviennent des roches les plus dures, comme les porphyres et les quartzites.

Leurs grains sont anguleux ou esquilleux, toujours à arêtes vives.

On rattache à ces sables artificiels et dans certains cas d'emploi on utilise comme tels le laitier granulé de haut fourneau, les scories ou cendrées broyées.

COMPOSITION GRANULOMÉTRIQUE DES SABLES.

23. — La grosseur maximum des grains à ranger dans la catégorie des sables ne peut être que conventionnelle; les différents pays ne sont pas d'accord à ce sujet et fixent cette dimension entre 5 et 8 m/m.

Avec M. Féret, directeur du laboratoire de Boulogne-sur-Mer, nous appellerons sable tous les grains qui passent au travers d'un tamis à trous circulaires de 5 m/m de diamètre.

Nous appellerons :

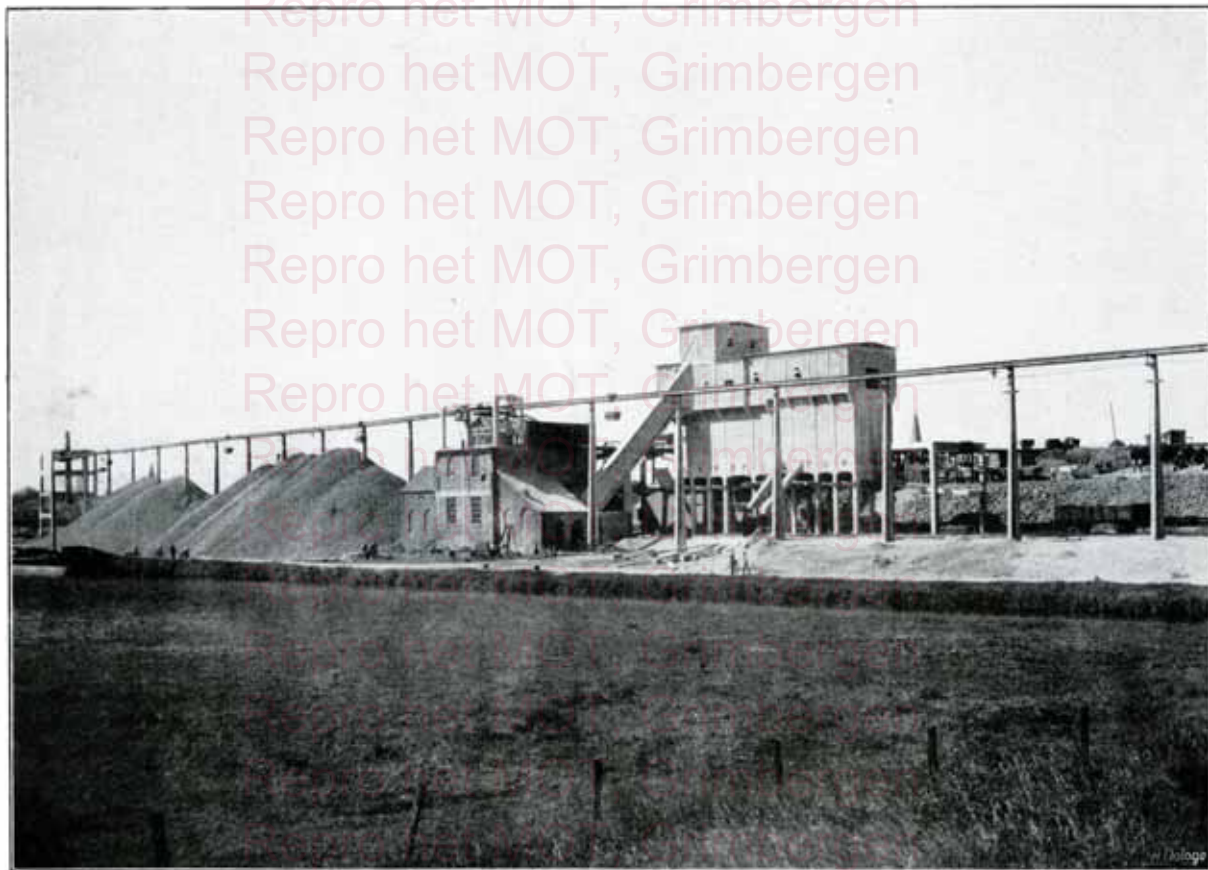
	Passant au tamis de :	Retenu au tamis de :
Sable gros . . .	5 m/m	2 m/m
Sable moyen . . .	2 m/m	0.5 m/m
Sable fin.	0.5 m/m	—

Nos sables de rivière et nos sables artificiels ou poussiers contiennent généralement ces trois catégories de grosseurs de grains, ou du moins les grosseurs moyennes et fines. Les poussiers notamment sont parfaitement calibrés et l'on trouve dans le commerce des poussiers 0/5 m/m, 0/3 m/m ou 0/2 m/m; on trouve de même du sable gros artificiel livré sous la dénomination de grenaille 2/5 m/m.

Presque tous nos sables de carrière sont fins. Les meilleurs ne contiennent que peu d'éléments moyens. Beaucoup sont même très fins.

La composition granulométrique des sables est très importante et généralement on ne lui apporte pas toute l'attention qu'elle mérite.

Les résistances des mortiers à la compression, leur facilité de mise en œuvre sont grandement dépendantes de la composition granulométrique du sable.



L'une des multiples usines à concasser dépendant du Syndicat des carrières de porphyre de Lessines.
Mise en stock automatique le long de la Dendre.

Pour une même richesse de ciment, on peut affirmer :

- 1° Que les mortiers sont d'autant plus résistants aux efforts de compression que leur sable est plus gros;
- 2° Qu'ils sont d'autant plus plastiques que leurs sables sont de grosseur mieux graduée et qu'ils contiennent une plus grande proportion d'éléments fins, ceci toutefois jusqu'à une certaine limite au delà de laquelle ils perdent inutilement de la résistance sans acquérir un accroissement correspondant de plasticité.

Ces deux constatations sont quelque peu contradictoires, aussi convient-il de faire choix du sable de composition granulométrique appropriée aux qualités désirées pour les mortiers (n° 43, 46 et 47).

Les sables qui réunissent les deux qualités de plasticité et de résistance sont les *sables complexes* formés d'éléments moyens et fins. Les meilleurs sont les sables de rivière et les sables artificiels ou les sables de carrière de composition analogue.

Les sables gros complexes conviennent si la plasticité n'est pas la qualité primordiale demandée pour les mortiers. A égalité de richesse de ciment, ils donnent les plus fortes résistances.

Les sables gros complexes à grains arrondis sont les plus commodes à mettre en œuvre.

Les sables gros artificiels à grains anguleux et esquilleux donnent des mortiers fort raides à travailler, même s'ils contiennent une proportion importante d'éléments fins.

Ces sables gros trouvent un excellent emploi dans les mortiers qui peuvent être comprimés ou pilonnés. Ils conviennent pour les revêtements d'aire bétonnée comme couche d'usure plus lisse et plus régulière, pour la confection de dalles de pavement et autres agglomérés; ils sont tout indiqués pour entrer dans la constitution des bétons.

L'emploi de *sables mixtes, mi-naturels, mi-artificiels* peut améliorer certains mortiers, car les sables artificiels contiennent souvent une proportion importante de fines poussières favorables à la compacité et à la plasticité.

Les *sables fins* offrent surtout l'avantage d'une mise en œuvre facile, mais donnent des mortiers d'autant moins résistants qu'ils sont plus fins. Ils sont employés dans les constructions ordinaires ne demandant pas de fortes résistances. Ils peuvent aussi servir à l'exécution des enduits.

S'ils sont additionnés de sables gros ou moyens, leur utilisation dans les bétons peut se faire dans de bonnes conditions.



Carrières de porphyre de Quenast. Vue générale des dépôts des pavés et « concassés » (Reproduction interdite).

Cliché obligeamment prêté par « La Technique des Travaux ».

CARACTÉRISTIQUES DE QUELQUES SABLES.

DÉSIGNATION		Composition granulométrique en %			Sable sec non tassé		Sable sec tassé à refus	
		gros 2/5 mm.	moyen 0,5/2 mm.	fin 0/0,5 mm.	Poids des 100 litres (1)	Vide en % (2)	Poids des 100 litres	Vide en % (2)
PORPHYRE.	Grenaille	100 %	—	—	131	52	166	38
	Poussier tout-venant 0/5	40	27	33	160	41	200	27
	Poussier 0/3	5	56	39	145	48	190	30,5
QUARTZITE.	Poussier	20,8	44,7	34,5	145	14	193	25,3
	Grenaille 2/5	36 % au dessus de 5 m/m 48,8	7,7	7,5	125,760	51	155,500	39,45
	Gros sable	100 %	—	—	148,5	43	172	33
DU RHIN.	Tout-venant	7 %	78	15	155	41	172	33,2
SABLE DE MEUSE.	Grenaille 2/5	60	30	10	165,5	33,77	197,8	24,95
	Sable	—	82	18	147,4	41,6	173	31,8
SABLE DE CARRIÈRE.	Des environs de Braine-le-Comte	0	30 de 0,5/1 mm.	70	138	48,2	175	32,7
	Sable blanc de Moll	0	3	97	140	47	170	36,4
	Des environs de Woluwé	0	0	100 dont 95 % de 0/0,3 mm.	136	48,6	165	37,3
	Yprésien extrêmement fin	0	0	100 dont 9 % de 0/0,1 mm.	120	54	152	41,2

(1) La détermination de ces poids a été faite au double décalitre.

(2) La détermination des vides est expérimentale.

Ces caractéristiques montrent que, à égalité de graduation de grosseur, le sable a un vide d'autant plus faible qu'il est plus gros. Ceci justifie l'accroissement correspondant de compacité et de résistance des mortiers, de même richesse en ciment, mais exécutés avec du sable de grosseur maximum de plus en plus élevée. Il est aussi à remarquer que les sables peuvent subir par secousses, pilonnage ou compression, un tassement énorme.

QUALITÉS D'UN SABLE.

24. — La bonne qualité d'un sable dépend :

1. *De sa composition granulométrique*, laquelle doit correspondre à l'usage auquel doit servir le mortier.

On la détermine par tamisage et évaluation des proportions, en poids, des différentes grosseurs de grains.

2. *De sa nature*. Un bon sable naturel est siliceux, propre, criant à la main. Il peut contenir du calcaire si celui-ci est dur. On tolère même,



Couche de matières argileuses en dépôt sur le sable.

avec avantage, 5 à 6 p. c. de particules friables argileuses ou calcaireuses. Ces fines poussières contribuent à la plasticité et à la compacité des mortiers.

L'évaluation assez grossière de la proportion des particules argileuses se fait très simplement en agitant du sable dans un tube gradué rempli d'eau. Après repos, les grains de sable se sont déposés de bas en haut en couches d'éléments de plus en plus fins. La couche supérieure de fines poussières se distingue aisément, ce qui permet d'apprécier son importance.

Les sables *artificiels* conviennent toujours s'ils proviennent de roches dures.

3. *Des impuretés qu'il contient.*

Matières organiques. — Elles sont toujours nuisibles. Il convient de débarrasser les sables, par lavage, des vases et matières organiques qu'ils contiennent. C'est là une opération longue et coûteuse.

Gypse et plâtre. — Ces matières détruisent la cohésion du mortier. Un sable qui en renferme ne peut être utilisé.

Sel marin. — Ce sel n'est pas nuisible à la bonne stabilité du mortier, mais il produit des efflorescences qui dégradent et déparent les parements.

Remarque.

Pour bien apprécier un sable (ou faire choix entre divers types de sable), il convient d'en faire l'essai, en mortier, au point de vue des propriétés désirées : plasticité, résistance, imperméabilité, etc.

CONSERVATION DES SABLES SUR CHANTIERS.

25. — Cette conservation ne nécessite aucune mesure particulière si ce n'est de protéger la réserve de sable contre toute souillure occasionnée par des matières nuisibles : terre, charbon, plâtre, etc., pouvant provenir des transports et de travaux voisins.

Si c'est possible, on mettra le sable à l'abri de la pluie : les dosages des mortiers en sable sec sont beaucoup plus exacts et plus réguliers. Les dosages en sable humide doivent être corrigés en tenant compte du foisonnement provoqué par l'humidité.

PIERRAILLES

NATURE ET FORME DE LA PIERRAILLE.

26. — Le plus souvent, on demande aux bétons de fortes résistances à l'écrasement ou à l'usure ; il faut donc les constituer avec des matériaux présentant eux-mêmes ces caractéristiques. Les meilleures pierrailles à utiliser dans les bétons sont les pierres dures, et même les pierres très dures si la résistance à l'usure est primordiale. Même si les bétons ne doivent agir que par leur masse et leur poids, c'est encore aux pierres dures qu'il faut donner la préférence, car elles sont les plus denses.

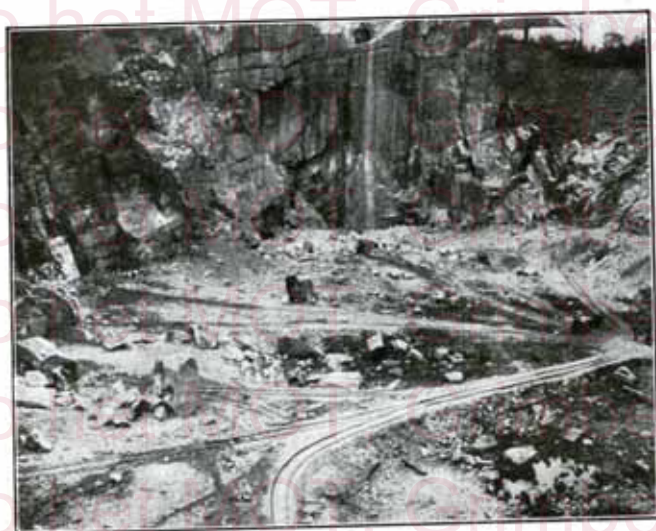
On emploie couramment :

Les graviers ou galets de rivière. Ils sont arrondis, ovoïdes, de nature siliceuse. On les extrait des cours d'eau en tout venant et c'est

par tamisage au crible qu'ils sont portés à la grosseur et à la gradation de grosseurs désirées. Dans notre pays on emploie les graviers du Rhin, de la Meuse et parfois de l'Ourthe;

Les pierres concassées. Elles permettent l'utilisation économique des roches les plus dures, impropres aux travaux de construction par suite de la difficulté de les tailler. Le béton leur a ouvert ainsi une voie d'applications très commodes et très variées sans avoir recours au burin ou au ciseau.

Ces pierres concassées sont anguleuses, de formes très variées, depuis la forme voisine du cube, dont le type est le macadam, jusqu'à



Carrières de quartzite de Dongelberg.

la forme esquilleuse, à arêtes très vives, qui se retrouve dans les plaquettes et le ballast.

Les plus utilisées en Belgique proviennent :

Des porphyres;

Des quartzites;

Des grès durs.

Commercialement on trouve :

Le macadam 20/40, 20/60 ou 40/60 mm.

Les plaquettes 5/10, 5/20 et 10/25 mm.

Le ballast tout-venant 10/40 à 10/60 mm.

Si l'on n'impose pas spécialement au béton une grande fatigue d'usure, les calcaires durs peuvent aussi convenir.

Le laitier concassé peut également trouver un emploi avantageux dans les bétons.

Accessoirement et à des fins plus particulières, on met en œuvre : des briquaillons, pour des fondations peu importantes; des matières poreuses, peu denses, telles les scories, cendrées, pour des travaux de bâtiment, quand on vise à la légèreté, à la porosité, à la faible sonorité des planchers ou cloisons, etc.

Forme de la pierraille. — On conçoit que la forme des éléments de la pierraille et la rugosité de leur surface aient un effet sur leur adhérence au mortier du béton. Cependant il semble que c'est à tort qu'on prête une moins bonne résistance aux bétons de cailloux roulés à cause de la forme arrondie et de la surface moins rugueuse des galets. Les diminutions de résistance proviennent plutôt d'une mauvaise composition granulométrique et d'une proportion défectueuse des sables



Atelier de concassage et de triage des carrières de quartzite de Dongelberg.

par rapport aux graviers, que de la forme même du gravier. Les galets peuvent donner des bétons de résistances au moins égales à celles des bétons de pierres concassées. C'est avant tout une question de bonne granulométrie du béton (n^o 47, 48).

COMPOSITION GRANULOMETRIQUE

27. — Comme pour le sable des mortiers, la composition granulométrique des pierrailles des bétons est très importante. La plasticité et la résistance des bétons en dépendent directement :

1^o Pour une même richesse en ciment et une quantité bien proportionnée de sable de bonne composition, les bétons offrent des résistances d'autant plus grandes que la pierraille est de plus grande dimension :

2° Les bétons sont également d'autant plus plastiques et plus faciles à mettre en œuvre que la gradation de grosseurs de la pierraille est meilleure.

Cette plasticité augmente encore si l'on accroît davantage la proportion des éléments de moyenne et petite dimensions, mais c'est au détriment de la résistance (n° 48).

La *grosseur maximum* des éléments est avant tout fonction des dimensions des pièces à fabriquer. Elle est plus grande pour le béton simple que pour le béton armé où l'écartement des armatures doit être pris en considération. Mais sous réserve de ces conditions, *il y a toujours intérêt et économie à adopter la grosseur de pierraille la plus forte possible* (n° 44).

Vide des pierrailles. — En principe, le béton est d'autant plus



Élévateur Silla pour sables et graviers extraits de la Meuse par la Société Anonyme d'Entreprise Générale de Travaux.

compact que les pierrailles laissent entre elles un vide plus réduit et qu'il faut par conséquent un moindre volume de mortier pour le combler.

La recherche de la composition de pierraille amenant une réduction de son vide n'est au fond qu'une question de détermination d'une bonne composition granulométrique (n° 33, 46).

Le vide diminue par la gradation dans la grosseur des éléments de la pierraille.

DÉSIGNATION DE LA PIERRAILLE.	PIERRAILLE sèche non tassée.		PIERRAILLE sèche et damée, tas- sement maximum.	
	Poids des 100 litres (1)	Vide en % (2)	Poids des 100 litres (1)	Vide en % (2)
I. Concassés de porphyre.				
Macadam 20/60	140	48,7	168	39,5
Macadam 20/40	138	50	62	41,7
Plaquettes 10/25	132	52,8	158	42,5
Plaquettes 5/20	130,5	53	158,5	42
Ballast 10/50	134	51	—	—
II. Concassés de quartzite.				
20/40	130	50,34	150,8	42,3
5/20	126	52	153	41,5
III. Galets du Rhin.				
20/40	146	43	167	36,2
10/25	150	42	170	34,8
5/20	155	40,5	174,5	33,5
IV. Galets de Meuse.				
20/40	153,2	40,8	170,4	34,7
5/30	152	41,5	—	—
10/25	158	39,3	173,6	33,5
5/20	61	37,7	175,1	32,55
V. Galets de Meuse concassés.				
20/40	140,7	46,2	158,4	39,7
10/25	136,9	47,5	158,7	39,1
5/20	137,4	46,3	165,5	36,3

(1) La détermination de ces poids a été faite à l'hectolitre.

(2) La détermination du vide est expérimentale.

Il diminue également quand on augmente la *grosseur maximum* de la pierraille.

La forme des pierrailles exerce également son influence, les pierres arrondies ayant un vide moindre que les pierres concassées.

Il est évident que le tassement réduit également le vide, mais dans une proportion moindre que pour le sable.

Il ne faut cependant pas croire que c'est nécessairement la pierraille à vide minimum qui donne le meilleur béton. Le mortier qui est en général moins résistant que la pierre, joue un rôle très important dans la résistance du béton. *La bonne composition du béton n'est atteinte que par une judicieuse proportion de ses quatre éléments : pierraille, sable, ciment, eau (n° 32 à 35).*



Usine de concassage de la Société Anonyme d'Entreprise Générale de Travaux.

QUALITÉS D'UNE BONNE PIERRAILLE

28. — La pierraille doit :

1° *Etre dure, résistante à l'écrasement et, si c'est nécessaire, résistante à l'usure ;*

2° *Faire bonne adhérence au mortier, ce qui demande des pierres à surfaces rugueuses ; mais cette rugosité peut être faible, microscopique même, c'est plutôt le poli des surfaces qui est nuisible ;*

3° *Etre de bonne composition granulométrique. Cette composition doit être corrigée au besoin, s'il s'agit de produits tout-venants, par la*

séparation de grosseurs à l'aide de tamisages, suivie d'un mélange approprié. Adopter la grosseur maximum la plus grande possible, eu égard à l'utilisation du béton.

4° *Etre propre.* On a beaucoup discuté sur la nécessité de laver la pierraille et de la débarrasser de sa propre poussière adhérente. Des essais ont montré que cette matière pulvérulente, si elle n'est pas en excès, n'est pas nuisible.

Les résistances des bétons ont été généralement meilleures avec des pierres non lavées qu'avec des pierres lavées.

Mais si de la vase ou des matières organiques sont adhérentes ou mélangées aux pierres, celles-ci doivent en être débarrassées. Le lavage peut s'effectuer à la lance, ou à l'eau courante dans des récipients appropriés : wagonnets, brouettes, bacs, etc., dont les fonds sont à claire-voie.

CONSERVATION DE LA PIERRAILLE

29. — Cette conservation ne nécessite aucune précaution spéciale, si ce n'est de mettre la pierraille à l'abri de souillures accidentelles par des matières organiques : terre, vase, charbon, boue, etc.

Eviter, dans la disposition des réserves triées à différents calibres, les mélanges des pierrailles ou de pierraille et de sable, ce qui fausserait les dosages.

EAU DE GÂCHAGE

QUALITÉ

30. — *On doit s'efforcer d'employer pour la fabrication des mortiers et des bétons une eau aussi pure que possible.*

Dans certaines circonstances on peut n'avoir à sa disposition que des eaux douteuses ou impures. Peut-on en faire usage ?

Des essais très nombreux et très complets effectués par le professeur Duff A. Abrams, de Chicago, il ressort qu'on peut utiliser la plupart des eaux stagnantes et de rivière même souillées par des eaux résiduaires industrielles, *sans réduire les résistances d'une façon vraiment dangereuse.*

Cependant il convient d'être très prudent dans leur emploi. L'aspect, l'odeur, la couleur ne constituent pas des indices suffisants ni pour l'adoption ni pour le rejet des eaux.

Ne peuvent être utilisées en aucun cas :

- Les eaux sucrières ;
- Les eaux acides ;
- Les eaux contenant plus de 5 à 6 p. c. de sel marin ;
- Les eaux contenant plus de 3 p. c. de sulfate de magnésium ou de gypse ;
- Les eaux trop riches en acide carbonique.

Par contre, peuvent être employées :

- L'eau de mer ;
- Les eaux de rivière, même souillées par les eaux résiduaires industrielles, sauf si elles sont acides ;
- Les eaux stagnantes et marécageuses ;
- Les eaux d'exhaure de charbonnages, etc.

Bien entendu, ce n'est qu'en cas d'absolue nécessité qu'il faut recourir à l'emploi de ces eaux. Leur utilisation se fait au détriment de la résistance du béton, mais n'a pas d'action nuisible dangereuse sur sa stabilité.

Dans les limites ordinaires de pourcentage d'impuretés de ces eaux, la diminution de résistance a varié de 10 à 15 p. c. Ces indications sont tirées de résultats d'expériences du professeur Duff A. Abrams.

Les eaux contenant plus de 5 à 6 p. c. de sels, tels du chlorure de calcium ou de sodium, du carbonate de soude, ont l'inconvénient d'amener des efflorescences à la surface des mortiers et ne conviennent pas pour l'exécution des enduits.

En résumé : Chaque fois qu'on le peut, il faut utiliser une eau aussi pure que possible.

Cependant, contrairement à l'opinion couramment admise, on peut admettre, en cas de nécessité, certaines eaux polluées pour la fabrication des bétons et mortiers. *Mais il est toujours prudent de s'assurer qu'elles ne contiennent aucune matière nuisible en excès, les renseignements donnés ci-dessus ne servant que d'indications générales.*

II. — Dosage des mortiers et bétons.

PRINCIPES DU DOSAGE.

31. — Qu'il s'agisse de mortiers ou de bétons, le but est d'agglomérer par le ciment, une matière inerte formée de sable et de pierraille. Cette matière inerte constitue *le squelette du mortier ou du béton*.

Ce squelette est nécessaire, car on ne peut envisager l'utilisation du ciment pur :

- A cause du coût élevé qui en résulterait pour les ouvrages ;
- A cause des déformations de retrait et de dilatation qui seraient excessives et qui mettraient en danger la stabilité des ouvrages par suite des efforts internes et des fissures qui se produiraient (n° 14).

Pour fixer un dosage de mortier ou de béton, *trois facteurs sont à considérer* :

- La richesse en ciment, c'est-à-dire la proportion de ciment par rapport au squelette ;
- La granulométrie du mortier ou du béton ;
- La quantité d'eau de gâchage.

RICHESSE EN CIMENT

32. — Dans les mortiers la pâte de ciment doit enrober tous les grains de sable et leur donner la cohésion par son durcissement.

Dans les bétons, on a parfois encore l'habitude d'envisager que c'est le mortier de ciment qui joue le rôle d'agglomérant de la pierraille ; il est cependant plus simple, plus général et plus exact, de considérer que c'est le ciment qui lie les uns aux autres les éléments du mélange plus complexe : sable, pierraille. Dans ce cas les principes de dosages deviennent identiques qu'il s'agisse de mortiers ou de bétons, la différence portant seulement sur la grosseur et la composition du squelette.

Tout le monde admet que la cohésion de ce squelette, c'est-à-dire la résistance des mortiers et des bétons aux efforts mécaniques, augmente avec l'accroissement de la richesse en ciment.

Souvent on n'a recours qu'à ce seul moyen pour obtenir les résistances désirées, en négligeant de faire rendre aux autres facteurs du dosage leur maximum d'effet.

Outre que cette solution est peu économique, elle est en même temps peu scientifique. Elle ne doit s'imposer que si l'on a déjà veillé

à la bonne granulométrie du squelette et à la juste proportion d'eau de gâchage, ou si la mise en pratique de ces solutions apparaît plus coûteuse.

COMPOSITION GRANULOMÉTRIQUE DES MORTIERS ET DES BÉTONS

33. — On peut obtenir économiquement les meilleurs mortiers et les meilleurs bétons, si l'on réalise une composition rationnelle de la granulométrie de leur squelette ou, plus exactement, du mélange final squelette et liant.

Cette condition est d'importance primordiale pour les bétons auxquels on demande avant tout de fortes résistances à l'écrasement et à l'usure.

Mortiers et bétons, composés tous deux d'éléments de toutes grosseurs, depuis la poussière la plus ténue, comme celle du ciment, jusqu'aux éléments les plus gros du sable ou de la pierraille, peuvent comporter des proportions très diverses d'éléments fins, moyens et gros avec toute la gamme des grosseurs intermédiaires. On conçoit aisément qu'il n'est pas indifférent d'avoir telle ou telle valeur pour ces proportions mais qu'il convient que les éléments d'une grosseur déterminée puissent se ranger entre les éléments de dimensions plus grandes de façon à y laisser le minimum de vides, ceux-ci étant eux-mêmes comblés par des particules de plus en plus fines. Mieux ces conditions seront remplies, plus les bétons et mortiers seront compacts et denses.

Pour les matériaux artificiels comme pour les pierres naturelles une texture serrée et dense, et par suite une faible porosité, sont des garanties de bonne résistance aux efforts mécaniques et aux agents atmosphériques.

*Le choix de la composition granulométrique des mélanges **ciment-sable** ou **ciment-sable-pierraille** est donc d'une importance capitale.* Très souvent l'on n'en tient pas suffisamment compte : les proportions de ciment, de sable et de pierrailles sont fixées, mais on néglige toute indication sur la granulométrie du sable, et souvent même sur celle de la pierraille.

QUANTITÉ D'EAU DE GACHAGE

34. — En réalité ce n'est pas uniquement le mélange des constituants secs qui doit donner la meilleure compacité ; l'eau est nécessaire au malaxage, à la mise en place, à l'enchâssement du squelette, à la prise et au durcissement du ciment. De ce fait, elle concourt au même titre que les autres éléments, à assurer la plus ou moins bonne compacité des mortiers et des bétons. *La quantité d'eau est du reste fonction de la granulométrie des matériaux du mélange.*

Plus ceux-ci sont fins, plus les éléments présentent une grande surface totale à humecter et plus grande est la quantité d'eau nécessaire pour fournir des mortiers et des bétons de plasticité équivalente.

La quantité d'eau minimum indispensable pour réaliser un bon malaxage et une bonne mise en place est toujours beaucoup plus élevée que celle qui est indispensable à la prise et au durcissement. Plus on augmente la quantité d'eau, plus on diminue la compacité. Dans les travaux en élévation, l'excès d'eau s'échappe des coffrages, s'évapore, laisse des vides intérieurs, fournit un matériau poreux de résistance réduite, sans compter qu'au point de vue chimique la prise du ciment est fortement ralentie et son durcissement considérablement diminué (n^{os} 6, 9). Voir formule de résistance des bétons n^o 54.

CONCLUSION

35. — La détermination des deux facteurs du dosage : — granulométrie — eau — est extrêmement importante. Aussi peut-on affirmer que *de deux bétons, ce n'est pas nécessairement celui qui contient le plus de ciment qui présente la plus grande résistance*. Il s'en faut de beaucoup, car à égalité de richesse en ciment on peut fabriquer des mortiers et des bétons présentant dans leurs résistances des différences atteignant 50 p. c., 100 p. c. et même davantage, si leur granulométrie est mal déterminée et si l'on emploie un excès d'eau de gâchage.

Le principe de l'augmentation certaine et correspondante de la résistance avec la richesse en ciment n'est exact que pour des mortiers et des bétons de même composition granulométrique et de même plasticité.

Pour arrêter un dosage économique, répondant à des conditions de résistance déterminées, avant de penser à accroître la richesse en ciment, il convient de faire rendre aux deux facteurs — granulométrie — eau — tout ce qu'ils peuvent donner dans les limites de la pratique des chantiers, c'est-à-dire en gardant aux mortiers et bétons un minimum de plasticité indispensable à leur mise en œuvre.

EXÉCUTION DES DOSAGES EN CHANTIER

36. — Les dosages sont déterminés :

Par les proportions de		Par les proportions de	
Pour les mortiers :	ciment,	Pour les bétons :	ciment,
	sable,		sable,
	eau.		pierraille, eau.

Le ciment se mesure en poids; le sable, la pierraille et l'eau en volume.

Si pour un matériau donné, on désire passer du dosage en poids au dosage en volume, ou inversement, il est nécessaire de déterminer par une expérience directe le poids de ce matériau occupant une capacité connue dans des conditions de remplissage et de tassement aussi voisines que possible de celles du chantier.

Si le sable et la pierraille ont naturellement ou commercialement une composition granulométrique convenable, le dosage pourra s'effectuer par une seule mesure de volume pour chacun d'eux.

Mais il sera souvent nécessaire, pour corriger une composition granulométrique défectueuse, en vue de réaliser un béton de composition constante, d'opérer des mélanges soit de deux sables, soit de deux pierrailles de grosseurs différentes. C'est ainsi que les sables fins de carrière ou les poussiers trop fins devront souvent être additionnés de sable plus gros ou de grenaille si la résistance est la caractéristique principale demandée aux mortiers et bétons.

37. — *Dosage du ciment.*

Il s'effectue en poids. Le sac de ciment pèse 50 kilogrammes, le baril contient 170 kilogrammes de ciment. Les proportions de squelette et d'eau sont déterminées de façon à correspondre à un nombre entier de sacs ou à un baril.

38. — *Dosage des sables.*

La mesure se fait en volume à l'aide de caisses, brouettes, wagonnets, bandes transporteuses, etc. Cette mesure manque de régularité, car le poids d'un même volume de sable occupant un même récipient est très variable; 1° suivant le tassement au remplissage; 2° suivant le degré d'humidité du sable.

A titre d'exemple, un même sable sec, dans des conditions différentes de tassement, peut peser au mètre cube de 1,400 à 1,700 kilogrammes si les grains sont arrondis et de 1,350 à 1,850 kilogrammes pour des sables artificiels à grains anguleux et esquilleux.

Si l'humidité du sable varie, les différences de poids d'un même volume rempli dans les mêmes conditions de tassement sont au moins aussi importantes.

Pour de faibles pourcentages d'humidité, le sable se tasse beaucoup moins que s'il est sec, les grains glissant difficilement les uns sur les autres. Au delà d'un certain pourcentage d'eau, le tassement augmente

au contraire avec la quantité d'eau jusqu'à devenir supérieur même au tassement du sable sec et atteindre son maximum lorsqu'il est gorgé d'eau.

Le diagramme XI montre les variations importantes qui peuvent se produire dans les poids de grenaille, poussier ou sable contenus dans une même capacité, le mode de remplissage étant identique mais les proportions d'humidité allant en croissant.

Le tableau qui suit (p. 70) est en partie déduit de ce diagramme; il évalue en pour cent les poids de sable, grenaille ou poussier réellement contenus, pour divers états d'humidité, dans un hectolitre, comparativement au poids de ces mêmes matières occupant, à l'état sec, la même capacité.

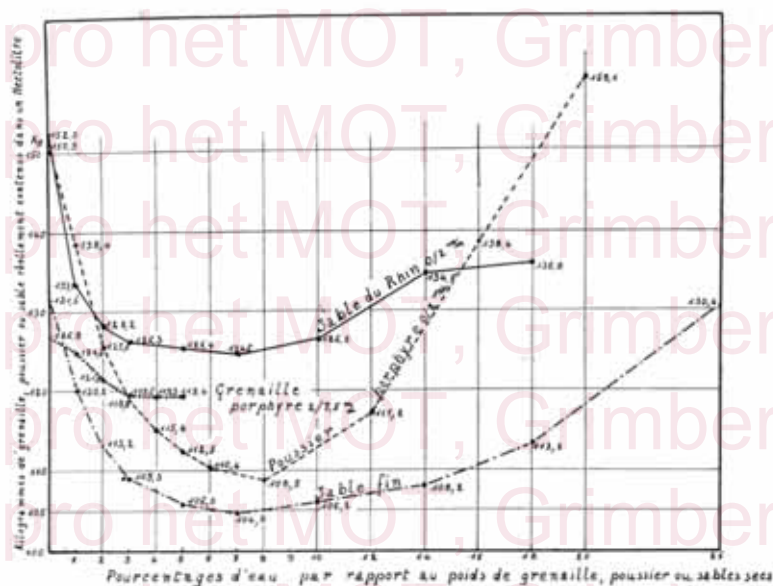


DIAGRAMME XI.

Variation du poids de sable ou poussier réellement contenu dans un hectolitre, en fonction du degré d'humidité de ces matériaux.

Les dosages en volume de sable et poussier qui entrent dans les compositions de mortiers et bétons conseillées plus loin, sont tirés d'essais effectués avec des matériaux complètement secs. *Pratiquement, comme il n'est pas possible de maintenir ces matières à l'état sec sur les chantiers, il est indispensable d'apporter à leur dosage en volume, des corrections basées sur les indications précédentes.*

Pourcentage d'humidité.	Grenaille 2/7,5 m/m.	Sable du Rhin 0/2 m/m.	Sable de Meuse 0/2 m/m.	Poussier de porphyre 0/2 m/m.	Poussier de Quartzite.	Sable fin 0,5 m/m.
0 o/o	100 o/o	100 o/o	100 o/o	100 o/o	100 o/o	100 o/o
1 o/o	98.5	87.3	91.2	91.6	84.6	91.4
2 o/o	95.8	84.00	84.2	83.1	78.2	86.2
3 o/o	94.4	82.8	81	78.6	75.9	83.2
4 o/o	94.2	—	81.3	76.4	73.3	—
5 o/o	94.3	82.2	82	74.4	71	80.6
6 o/o	—	—	82.4	73.1	71.9	—
7 o/o	—	81.6	—	—	—	79.7
8 o/o	—	—	82.8	71.75	77.8	—
10 o/o	—	82.9	83	—	78.1	80.8
12 o/o	—	—	83.5	77.5	82.6	—
14 o/o	—	88.2	85.5	—	90.8	82.4
16 o/o	—	—	87.5	91.6	97.8	—
18 o/o	—	89.00	90	—	104.7	86.2
20 o/o	—	—	92.6	105.4	—	—
22 o/o	—	—	95.8	—	—	—
25 o/o	—	—	—	—	—	99.2

39. — Dosage de la pierraille.

Ce dosage s'effectue en volume, comme pour le sable, mais sa mesure est beaucoup plus exacte, le poids d'un même volume étant

beaucoup moins influencé par le tassement et l'humidité dans les conditions habituelles de mesure des chantiers.

40. — *Dosage de l'eau.*

Il doit se faire en volume, soit à l'aide d'une capacité jaugée, soit à l'aide d'une conduite d'eau à débit connu, et non au jugé comme cela se pratique couramment.

Dans le dosage de l'eau il doit être tenu compte :

des conditions atmosphériques du moment : sécheresse ou pluie ;
de l'état d'humidité éventuelle du squelette exposé aux intempéries ;

du pouvoir absorbant des matériaux poreux mis en œuvre, etc.

Ce dosage comme celui du sable, demande une surveillance et une attention toutes particulières.

CHOIX DU DOSAGE DES MORTIERS ET DES BETONS

RICHESSE EN CIMENT

41. — Elle est fonction des caractéristiques que l'on impose aux mortiers et aux bétons.

Elle dépend de la nature et de la qualité du ciment, de la composition du squelette, de la résistance à obtenir, de l'imperméabilité ou d'autres conditions à réaliser.

La pratique et les recherches donnent des indications sur les quantités de ciment que l'on peut généralement admettre par mètre cube de mortier ou de béton suivant l'usage de ces derniers.

On trouvera plus loin les dosages qui sont recommandés pour divers emplois, ainsi qu'un tableau donnant le pourcentage de ciment en poids par rapport au poids total des matières sèches — (ciment + squelette) — qu'il convient de prendre pour réaliser une richesse déterminée de ciment au mètre cube de béton exécuté (n^{os} 56, 57).

Des formules sont également données aux n^{os} 52 et 53 permettant de faire choix des dosages réalisant une richesse déterminée en ciment par mètre cube de béton exécuté.

QUANTITÉ D'EAU

42. — La proportion d'eau dépend de la composition granulométrique des éléments à malaxer et du mode d'exécution des maçonneries et bétons.

C'est ainsi que presque toujours les mortiers de maçonnerie seront

très plastiques et fluants; dans certains cas, où ils peuvent être battus, pilonnés ou comprimés, ils seront beaucoup plus secs et plus raides, à l'avantage de leurs résistances.

Pour les bétons, il va de soi que la quantité d'eau sera croissante suivant que l'on passera des bétons d'aspect simplement humide destinés



Mesure de la plasticité par le « Slump Test ».
Moule tronconique de 30,45 cm. (12 pouces) de hauteur,
20,30 cm. (8 pouces) de diamètre à la base inférieure,
et 10,15 cm. (4 pouces) de diamètre à la base supérieure.
Affaissements de bétons de plasticités différentes.

à recevoir un damage énergique, aux bétons plastiques pour lesquels le damage est encore nécessaire mais peut être plus léger, et enfin aux bétons coulés qu'il suffit de régaler.

Mais il ne faut pas croire que la quantité d'eau est le seul facteur

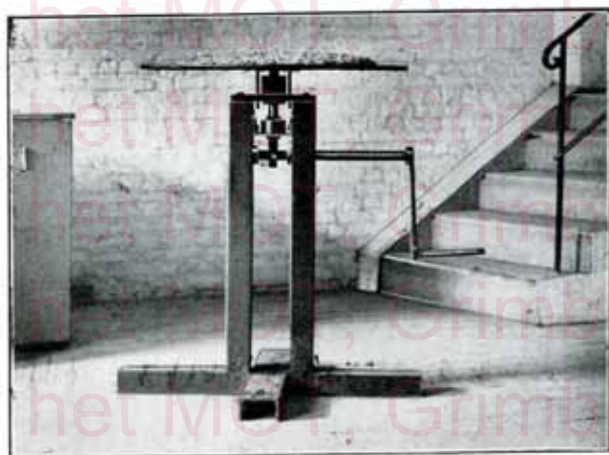


Table à secousse.

qui règle la plus ou moins grande plasticité des mortiers: la granulométrie du mélange y intervient pour une large part.

La composition granulométrique du béton étant déterminée, la quantité d'eau doit être fixée par expérience en gâchant les matériaux

avec une proportion d'eau croissante jusqu'à obtenir les qualités d'exécution demandées.

Nous donnons plus loin quelques indications pouvant servir de base à la détermination de la quantité d'eau nécessaire pour obtenir un béton de plasticité désirée (n° 53).

Le contrôle du dosage en eau et de la plasticité du béton peut se faire aisément sur le chantier à l'aide de procédés simples tels que celui du « slump test ». Le slump test, d'origine américaine, consiste à remplir de béton fraîchement malaxé un moule de forme tronconique aux dimensions données à la figure ci-dessus. Après démoulage immédiat, le cône de béton s'affaisse sous son propre poids d'une quantité qui peut être mesurée et qui donne une appréciation grossière mais suffisante de la plasticité du béton.



Moule pour la mesure de la plasticité du béton à la table à secousse.
Bétons de plasticités différentes.

Une mesure plus exacte de la plasticité du béton peut être obtenue au moyen de la table à secousse.

Un tronc de cône de béton est moulé, sans être damé, dans une forme appropriée dont la hauteur et le diamètre de la base supérieure sont respectivement égaux à la moitié et aux deux tiers du diamètre de la base inférieure (dimensions habituelles : 15 — 20 — 30 cm.).

Ce tronc de cône est disposé au centre de la table à secousse, à laquelle on fait subir, en dix secondes, 15 soulèvements et chutes successifs de 15 m/m de hauteur.

Le rapport du diamètre auquel la masse de béton ou de mortier s'est étalée, au diamètre de la base inférieure du tronc de cône primitif, donne la mesure du degré de plasticité.

COMPOSITION GRANULOMÉTRIQUE DES MORTIERS ET BÊTONS

43. — Mortiers. — Grosséur maximum du sable (n° 23).

Les sables gros (c'est-à-dire allant jusqu'à 5 m/m) conviennent pour les revêtements d'usure de faible épaisseur à appliquer sur les aires bétonnées pour leur donner une surface plus unie. On les utilise égale-

ment pour la fabrication des dalles, briques, agglomérés de construction, d'une épaisseur égale ou supérieure à 4 centimètres.

Lorsqu'il s'agit d'obtenir des agglomérés d'épaisseur moindre, 1 à 3 centimètres : tuiles, carreaux, tuyaux de ciment, etc., on emploie des sables de 2 à 3 millimètres de dimension maximum.

Les mortiers de très bonne maçonnerie et les mortiers d'enduit se font avec des sables complexes, mélanges de sables moyens et fins.

Dans notre pays, force est de faire usage des ressources abondantes en sable fin.

Pour les maçonneries courantes, ils donnent des mortiers de résistance très suffisante mais très inférieure à celle que fournissent les sables complexes. Par contre, si la richesse en ciment est suffisante, le sable fin permet l'exécution de mortiers de bonne imperméabilité pouvant servir aux enduits.

Les ornements en pierres artificielles destinés aux bâtiments d'habitation demandent l'emploi de poussières contenant une proportion de très fine poussière d'autant plus importante que l'on désire obtenir une plus grande finesse de moulage.

44. — *Bétons. — Grosseur maximum de la pierraille.*

Le choix de la grosseur maximum de la pierraille est en rapport avec les dimensions des pièces, poutres ou massifs à confectionner.

Pour du béton simple, c'est-à-dire non armé, on peut admettre les rapports suivants :

Pièces de section carrée ou rectangulaire : les éléments les plus gros ne doivent pas dépasser le cinquième du plus petit côté de la pièce.

Pour des dallages ou revêtements de grande surface par rapport à leur épaisseur, on peut admettre comme dimension maximum de la pierraille le quart et même le tiers de l'épaisseur de la dalle.

S'il s'agit d'exécuter du béton armé, outre les conditions énoncées ci-dessus, il est recommandé de ne pas utiliser de pierrailles dont la dimension dépasse ni la moitié de la distance minimum entre les armatures, ni la moitié de la distance entre les armatures et les parois du coffrage.

Au point de vue résistance, il faut avoir recours à la pierraille dont la grosseur est maximum tout en restant compatible avec les conditions précédentes et la nécessité d'une plasticité suffisante pour l'exécution du bétonnage.

45. — Les règles fixant la composition granulométrique des mortiers et bétons sont développées aux n° 46 et suivants.

III. — Détermination de la composition granulométrique des mortiers et des bétons et de leur dosage en ciment et en eau.

46. — Des recherches et des essais très étendus poursuivis par la Direction technique du Groupement Professionnel (1), on peut conclure qu'une très bonne compacité des bétons sera obtenue si l'on réalise la granulométrie donnée aux tableaux et diagrammes qui suivent.

Ces tableaux comportent *trois compositions-types de béton* : la composition A, la composition B et la composition C (2).

Chaque tableau indique pour chaque grosseur d'élément d , déterminée par son rapport à la grosseur maximum D du squelette, le pourcentage en poids que le mélange des matériaux secs (ciment + squelette) doit contenir en éléments de grosseur inférieure à d . En d'autres termes, ces tableaux I et II donnent la proportion en poids que le mélange des constituants secs du béton doit laisser passer à travers chaque tamis à trous circulaires de diamètre d .

Ils sont différents suivant qu'il s'agit de bétons de pierres concassées ou de bétons de galets.

Ces indications servent également à déterminer la composition des mortiers.

Leur application est donc générale.

Les proportions de ciment, de sable, de pierraille sont obtenues en poids. *Pour réaliser ces dosages en chantier, il faut, par une mesure expérimentale, effectuer la transformation des proportions en poids de sable et de pierraille en proportions équivalentes en volume* (3).

(1) Ces essais ont été commencés au Laboratoire d'essais des matériaux de l'École militaire et poursuivis à l'Université libre de Bruxelles qui a bien voulu mettre ses laboratoires à la disposition du Service de recherches du groupement professionnel des fabricants de Ciment Portland artificiel.

(2) Les indices c ou g qui, dans ces tableaux, suivent les lettres A, B ou C indiquent que la pierraille est constituée, soit de concassé, soit de galets.

(3) Pour les sables et pierrailles, la correspondance des poids et des volumes a été déterminée au laboratoire et indiquée précédemment aux n^{os} 23 et 27. On peut utiliser ces données à défaut d'autres déterminations, mais il convient : 1^o de prendre comme poids de l'unité de volume ceux qui correspondent aux matériaux non tassés, ce qui se rapproche davantage de la façon d'exécuter les dosages en chantier ; 2^o de les corriger, pour les sables ou poussières, en tenant compte éventuellement de leur pourcentage d'humidité.

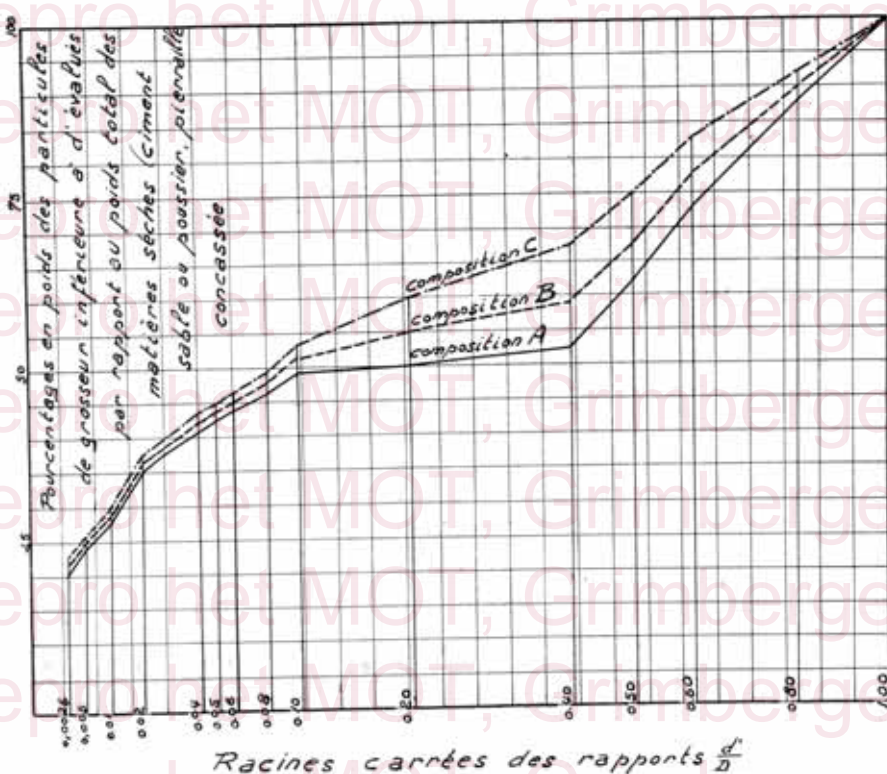
COMPOSITION GRANULOMÉTRIQUE DES MATIÈRES SOLIDES DES BÉTONS
EN FONCTION DE LA DIMENSION MAXIMUM D DE LA PIERRAILLE

TABEAU I

a) *Pierraille concassée — sable ou poussier — et ciment.*

Pourcentages en poids (1).

$\frac{d}{D}$	1.00	0.80	0.60	0.50	0.40	0.20	0.10	0.08	0.06	0.05	0.04	0.02	0.01	0.005	0.0025
Composition Ac	100	85	70	60	51	44	38	37	35	33	32	26	21	17	14
Composition Bc	100	88	77	68	60	48	40	38	36	35	33	27	23	18	15
Composition Cc	100	91	81	76	70	53	42	39	38	36	35	28	24	19	16



Racines carrées des rapports $\frac{d}{D}$

DIAGRAMME XII.

Courbes de granulométrie des bétons de concassés A, B et C.

(1) Les pourcentages indiqués dans ces tableaux et diagrammes sont à réaliser en poids. Cependant les recherches conduites par les services du Groupement ont abouti à la détermination plus exacte des pourcentages en volumes absolus des matières solides entrant dans la constitution des bétons. (Le volume absolu d'un poids déterminé de

TABLEAU II

b) Galets (de forme arrondie), sable et ciment.

Pourcentages en poids (1).

$\frac{d}{D}$	1.00	0.80	0.60	0.50	0.40	0.20	0.10	0.08	0.06	0.05	0.04	0.02	0.01	0.005	0.0025
Composition Ag	100	84	69	59	50	41	33	31	30	27	26	22	19	15	13
Composition Bg	100	88	74	68	59	47	36	33	31	30	28	23	20	16	14
Composition Cg	100	91	81	76	69	53	39	36	33	32	29	25	21	17	15

REGLES D'EMPLOI DES TABLEAUX DE COMPOSITION GRANULOMÉTRIQUE DES BÉTONS

CHOIX DE LA COMPOSITION GRANULOMÉTRIQUE

47. — 1° Caractéristiques des compositions A. B. C.

Composition A. — Elle fournit des bétons de compacité et de résistance maxima réalisables pratiquement. L'exécution de ces bétons demande beaucoup de soins et comme ils sont assez raides (ils le sont d'autant plus que la grosseur maximum de la pierraille est plus élevée), ils exigent un damage énergique.

L'emploi de ces bétons s'indique quand on peut procéder à une exécution très soignée et que l'on désire obtenir de grandes résistances à la compression et à l'usure.

Composition B. — Cette composition donne aux bétons une

matière est obtenu en divisant ce poids par le poids spécifique de ce matériau.) Cette dernière solution a l'avantage d'être générale puisqu'elle s'applique à toutes espèces de matériaux indépendamment de leur poids spécifique. Il suffit de transformer les pourcentages des volumes absolus en proportions pondérales correspondantes. (Voir les articles « Dosage rationnel des mortiers et bétons » parus dans la publication française des matériaux de construction et de travaux publics du mois de septembre 1927 et suivants.)

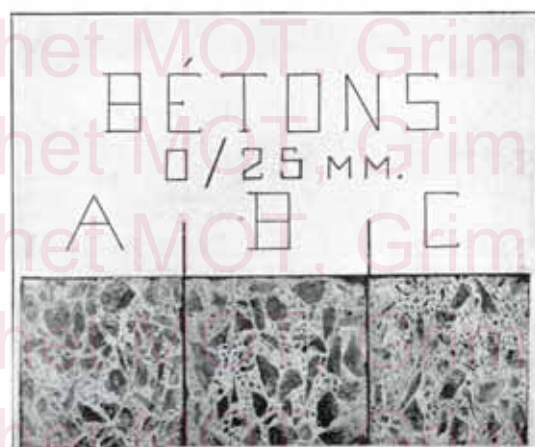
C'est pour éviter ce calcul que les chiffres de pourcentages en volumes absolus primitivement déterminés ont été légèrement modifiés et arrondis pour en arriver à ceux des tableaux ci-dessus qui donnent directement les proportions en poids. Celles-ci conviennent pour des bétons de richesse en ciment habituellement en usage et comportant un squelette constitué par : des galets ou sables siliceux, de la pierraille ou du poussier de porphyre, de grès siliceux ou de quartzite, c'est-à-dire par des éléments dont le poids spécifique est voisin de 2.65.

(1) Voir la note 1 relative au tableau I ci-avant.

meilleure plasticité. Leur exécution et leur mise en place sont plus faciles. Ils présentent à la fois de bonnes résistances et une bonne compacité. Ils conviennent dans la plupart des cas.

Composition C. — Ces bétons sont plastiques et d'exécution très commode. Ils peuvent également être gâchés assez secs et damés. Par leur composition granulométrique, ils se prêtent à l'exécution de béton fluide, pouvant se couler. Dans ce cas, ils offrent des résistances et des compacités d'autant moindres qu'ils ont plus de fluidité.

2° Les compositions A, B, C, s'entendent pour des bétons de richesse en ciment habituellement en usage et à squelette dont le poids



Coupes montrant la variation de composition de trois bétons A, B et C, de plaquettes de porphyre 10/25.

spécifique est voisin de 2.65. La plupart des matériaux utilisés dans la fabrication des bétons sont dans ce cas. Il en est ainsi notamment pour les sables et galets siliceux, pour les poussières et pierrailles concassées de porphyre, de grès siliceux et de quartzite dont les poids spécifiques varient de 2.55 à 2.72.

3° *Compositions A ou B ou C, suivant la grosseur maximum du squelette.* — Avec chacune de ces compositions, les mortiers et les bétons sont d'autant plus raides et difficiles à mettre en œuvre que la dimension maximum du squelette est plus grande.

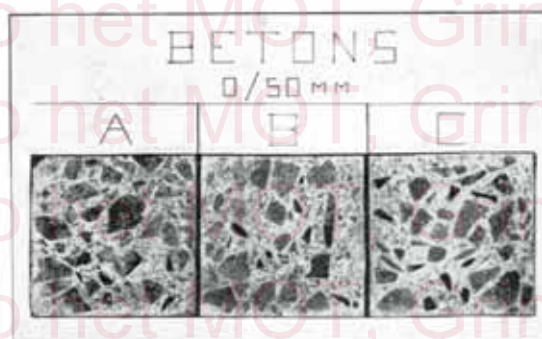
La composition A convient pour les mortiers dont le sable n'a pas une dimension supérieure à 8 millimètres.

Les compositions A et B sont recommandées pour des bétons dont la pierraille ne dépasse pas 25 millimètres.

Au delà de 25 millimètres, ce sont les compositions B et C, qui amènent une plasticité suffisante.

4° Si l'on désire déterminer le pourcentage d'éléments de grosseur égale ou inférieure à une dimension d , fraction de D , non indiquée aux tableaux, on procède par interpolation entre les deux dimensions voisines, immédiatement supérieure et inférieure à d .

5° *Eléments fins.* — Les proportions d'éléments fins et surtout de très fins, doivent être suffisantes pour donner de la plasticité et de l'imperméabilité aux bétons et mortiers; mais leur excès est nuisible à la résistance des bétons. Il est à remarquer que, tenant compte de ce fait, les compositions A, B et C sont peu différentes l'une de l'autre en



Coupes montrant la variation de composition de trois bétons A, B et C de macadam de porphyre 20/50.

ce qui concerne les proportions à adopter pour les particules de dimensions d inférieures à $\frac{D}{10}$. Pratiquement, il convient de s'écarter le moins possible des pourcentages indiqués. Un excès de très fin ne peut être admis que s'il est dû à un accroissement de la richesse du béton en ciment.

RÉALISATION PRATIQUE DES COMPOSITIONS A, B, C.

48. — La réalisation pratique de la gradation de grosseur recommandée serait fort coûteuse. Elle nécessiterait un premier travail de séparation de grosseurs à l'aide d'un jeu complet de tamis, suivie d'une reconstitution du squelette au moment du mélange, d'après les proportions indiquées. Travail long et coûteux. De plus, on ne dispose pas toujours de toute la gamme de grosseurs, ou l'on est obligé d'avoir recours à des matériaux soit tout-venants, soit classés commercialement,

ou enfin il faut utiliser ceux qu'offrent les ressources locales de la région où le travail s'exécute.

L'emploi des « tout-venants » n'est pas à recommander; il faut toujours craindre l'irrégularité de leur composition granulométrique, accentuée encore par la séparation de grosseur qui se produit facilement au cours des transports et manipulations que les matériaux doivent subir.

Ces dangers paraissent plus à craindre pour les « tout-venants » de « concassé » que pour les « tout-venants » de « galets ». Ceux-ci présentent généralement une granulométrie plus régulière par suite du lotissement naturel qu'ils ont subi et, de plus, les graviers se prêtent moins que les concassés à la séparation de grosseurs signalée ci-dessus.

Néanmoins si, pour des raisons d'économie par exemple, on doit faire emploi de tels matériaux, il convient de surveiller de très près leur granulométrie et d'y apporter les corrections nécessaires pour les porter à la composition désirée.

Dans ce cas, il semble préférable de séparer directement ces matériaux en deux lots au moins, sable et pierraille, et de reconstituer le squelette par un mélange approprié.

Le plus souvent, sur les chantiers, on se contente de *proportionner ces deux éléments* : le sable et la pierraille.

C'est la solution la plus simple, et qui est acceptable aux conditions suivantes :

a) La granulométrie de chacun de ces deux éléments, considérés séparément, doit être telle qu'elle permette de réaliser, par la combinaison de ces deux matériaux, une composition du squelette qui se rapproche de celle qui a été choisie. A cette fin, il convient que la séparation, au point de vue dimensions des particules, entre le sable et la pierraille, corresponde au dixième ou au cinquième ou à une fraction intermédiaire de la dimension maximum D de la pierraille.

b) Le sable et la pierraille doivent garder une granulométrie constante.

Si l'on désire réaliser une composition régulière du squelette, le dosage simple — sable et pierraille — ne convient guère que pour les mortiers et pour des bétons dont la dimension maximum du squelette ne dépasse pas 25 millimètres. Si la pierraille est de grosseur supérieure à 25 millimètres, ou si les granulométries propres des deux matériaux à combiner ne sont pas convenables, il est préférable de composer le squelette par le *mélange de trois catégories de grosseurs*. On arrive ainsi à une granulométrie des bétons et des mortiers qui peut être maintenue

très régulière et répondre aux qualités qu'on leur demande au point de vue compacité, résistance ou facilité de mise en place.

A cette fin le squelette peut être constitué par les trois catégories de grosseurs suivantes, variables suivant les matériaux dont on dispose et suivant la dimension maximum D de la pierraille.

a) *Eléments fins* : sables ou poussières formés :

- Soit uniquement de grains fins > 0.5 millimètre ;
- Soit de grains moyens et fins de 0 à 2 millimètres ;
- Soit d'un mélange naturel ou artificiel de particules de 0 à 5 millimètres, comportant une proportion convenable de grains gros (2/5 millimètres).

Les dimensions de particules désignées ici sous la qualification de fines, moyennes et grosses s'entendent pour les sables et les poussières constituant les éléments fins du squelette des bétons.

b) *Eléments intermédiaires* comportant :

- Du sable gros, du gravillon ou de la grenaille de pierraille concassée, dont les dimensions sont 2/5 à 2/10 millimètres ;
- Du gravillon ou de la plaquette de concassé de 5 à 20 millimètres, si la dimension maximum de la pierraille est au moins 40 millimètres.

c) *Eléments gros*. — Leurs dimensions sont variables. Ils sont constitués par la pierraille proprement dite de grosseur supérieure à celle des éléments intermédiaires.

A l'aide des tableaux I et II, on peut déterminer les proportions de ces trois catégories de grosseurs qui permettent de se rapprocher de la composition théorique adoptée.

— Mais il arrive fréquemment que les matériaux à mettre en œuvre sont constitués soit par des « tout-venants » tirés des ressources locales, soit par des poussières ou des pierrailles concassées de grosseurs répondant à un classement commercial, soit encore par une combinaison obligée des deux ; de ce fait, ils peuvent ne pas permettre de réaliser la gamme complète des grosseurs imposées depuis les particules très fines jusqu'aux éléments à dimension maximum D.

Si cette continuité de grosseurs fait défaut, on peut encore, à l'aide de compositions types A, B ou C, déterminer immédiatement les proportions de chacune des trois catégories de grosseurs en tenant compte des indications suivantes :

Le pourcentage en poids à prendre pour une catégorie quelconque (celle-ci étant déterminée par la grosseur maximum et la grosseur minimum de ses propres éléments) sera d'abord calculé comme si la

gradation des particules était continue, puis augmenté de la moitié des pourcentages des éléments de grosseurs manquantes :

1° Entre cette catégorie et celle qui la précède (au point de vue dimension des particules) ;

2° Entre cette catégorie et celle qui la suit (au point de vue dimension des particules).

Exemple : Pour constituer le squelette d'un béton, on dispose de matériaux dont les grosseurs sont définies de la façon suivante par rapport à la dimension maximum D de la pierraille :

1^{re} catégorie : éléments fins : de 0 à 0,04 D (y compris le ciment) ;

2^e » » intermédiaires : de 0,1 D à 0,2 D ;

3^e » » gros : de 0,4 D (y compris le ciment) ;

S'il s'agit de pierraille concassée, on réalisera la composition Bc de la manière suivante :

La composition Bc donne :

VALEURS DE d		o/o en poids des particules d	Différences
1 ^{re} catégorie	O	0 o/o	33 o/o
	0,04 D	33 o/o	
	grosseurs manquantes		7 o/o
2 ^e catégorie	0,1 D	40 o/o	8 o/o
	0,2 D	48 o/o	
	grosseurs manquantes		12 o/o
3 ^e catégorie	0,4 D	60 o/o	40 o/o
	D	100 o/o	

Pourcentages à adopter :

$$a) \text{ Éléments fins : } 0/0,04 D : 33,0 + \frac{7}{2} = \dots\dots\dots 36,50 \text{ o/o}^{(*)}$$

$$b) \text{ Éléments intermédiaires : } 0,1 D/0,2 D : \frac{7}{2} + 8 + \frac{12}{2} = \dots\dots\dots 17,50 \text{ o/o}$$

$$c) \text{ Éléments gros : } 0,4 D/D = 40 + \frac{12}{2} = \dots\dots\dots 46,00 \text{ o/o}$$

$$\text{Total.} \dots\dots\dots 100,00 \text{ o/o}$$

(*) Y compris le ciment.

Cette composition suppose évidemment que chaque catégorie de grosseurs comporte une bonne granulométrie propre.

Il est à remarquer également que la facilité d'exécution des mortiers et des bétons diminue d'autant plus que les grosseurs manquantes croissent en importance. La gradation continue dans les grosseurs du squelette doit surtout être observée d'autant plus que possible, si l'on désire exécuter du béton coulé, afin de maintenir l'homogénéité de composition au cours de la coulée.

Au contraire les compacités et les résistances peuvent même être favorisées par l'absence voulue de certaines catégories de grosseurs.

— Il peut enfin se présenter que les catégories de grosseurs à mettre en œuvre ne soient pas nettement séparées mais comportent toutes deux une certaine proportion de particules de mêmes dimensions. Dans ce cas, on arrivera facilement par quelques tâtonnements, à fixer dans la zone des grosseurs communes la dimension la plus convenable à adopter pour établir une séparation fictive entre les deux lots de matériaux.

En se basant sur cette dimension, on déterminera à l'aide des tableaux I et II, les proportions du mélange de ces deux matériaux. Un exemple de cette détermination est donné à la fin du n° 55.

49. — On considérera que la *grosseur maximum* d'un sable, d'un poussier, d'une grenaille ou d'une pierraille est celle qui correspond au diamètre des ouvertures circulaires du *tamis à trous les plus petits qui n'en retient qu'une proportion de 5 p. c. environ*.

La *grosseur minimum* de ce même matériau correspondra au diamètre des ouvertures circulaires du *tamis à trous les plus grands qui n'en laisse passer qu'une proportion de 5 p. c. environ*.

50. — Concassage de la pierraille.

Si l'on doit exécuter le concassage de la pierraille en vue d'un travail de bétonnage déterminé, les compositions A, B ou C permettent également de fixer quelles doivent être pour le *squelette* les proportions de gros, intermédiaires et poussier que le concassage doit réaliser, et de régler en conséquence la marche de celui-ci.

Exemple: Le béton à exécuter doit comporter 14 p. c. de ciment; la grosseur maximum de la pierraille est D. On peut admettre comme proportions convenables en poids pour le *squelette* seul:

	GRS	INTERMÉDIAIRES	POUSSIER
	D à 0,2 D	0,2 D à 0,04 D	< 0,04 D
	%	%	%
Composition A . . .	65	14	21
» Bc . . .	60	18	22
» Cc . . .	54,5	21	24,5

51. — *Granulométrie déterminée à l'aide de tamis à trous circulaires et à l'aide de tamis à mailles carrées.*

Correspondances que l'on peut admettre pour les grosseurs d'éléments définis par une analyse granulométrique du sable, obtenue d'une part à l'aide d'une série de tamis à trous circulaires et, d'autre part, à l'aide de tamis à mailles carrées :

Nombre de mailles par centimètre carré.	Diamètres correspondants pour les tamis à trous circulaires.
4,900	0.115 millimètres.
900	0.22 »
480	0.37 »
324	0.45 »
144	0.85 »
64	1.3 »
25	1.9 »
9	3.5 »
4	5 »

FORMULE DONNANT, POUR LES COMPOSITIONS A, B ET C, LES POURCENTAGES DE CIMENT EN POIDS A ADMETTRE POUR RÉALISER UNE RICHESSE DÉTERMINÉE DE CIMENT PAR MÈTRE CUBE DE BÉTON EXÉCUTÉ.

52. — A la condition que les bétons soient soigneusement damés ou suffisamment plastiques ou fluides, de façon à ne présenter, lorsqu'ils sont frais, qu'une proportion négligeable de vides intérieurs (air), les formules suivantes permettent, suivant le cas, de déterminer à priori le pourcentage de ciment nécessaire pour amener la richesse désirée par mètre cube de béton exécuté.

$$C \% = \frac{37.3}{\frac{1000}{N} - W + 0,053} \quad (1)$$

N = nombre de kilogrammes de ciment par mètre cube de béton exécuté (à 2 p. c. près).

$$C \% = \frac{\text{Poids ciment}}{\text{Poids (ciment + sable ou poussier + pierraille)}} \times 100$$

$$W = \text{rapport « eau — ciment »} = \frac{\text{Poids d'eau}}{\text{Poids de ciment.}}$$

Les valeurs de W sont déduites de la formule et des indications données au n° 53.

Inversement, connaissant la valeur du C %, on peut déterminer la richesse en ciment par mètre cube de béton :

$$N = \frac{1000}{\frac{37,3}{C \%} + W - 0,053} \quad (2)$$

QUANTITÉS D'EAU A EMPLOYER POUR LA FABRICATION DES BÉTONS DE COMPOSITION A, B OU C

53. — Pour les bétons de pierrailles concassées de composition A, B ou C répondant aux règles énoncées précédemment et pour certains matériaux indiqués ci-après et mis en œuvre à l'état *parfaitement sec*, on peut, à l'aide des indications suivantes, déterminer, d'une façon suffisamment exacte, la quantité d'eau nécessaire pour fabriquer un béton répondant à une consistance déterminée.

Cette quantité d'eau est calculée en tenant compte du poids de ciment qui entre dans chaque gâchée de béton. Elle se déduit de la connaissance du rapport « eau-ciment » = $W = \frac{\text{Poids eau}}{\text{Poids ciment}}$.

Ce rapport se détermine à l'aide d'une des deux formules suivantes, selon qu'on se fixe C % ou N :

$$W = k \times m \times m_1 \times m_2 \left(\frac{9,5}{C \%} + 0,05 \right) \quad (3) \quad \left. \begin{array}{l} \text{Béton} \\ \text{de pierrailles} \\ \text{concassées.} \end{array} \right\}$$

$$\text{ou} \quad W = \frac{k \times m \times m_1 \times m_2 \left(\frac{257}{N} + 0,063 \right)}{1 + 0,257 \times m \times m_1 \times m_2} \quad (4)$$

$$C \% = \frac{\text{Poids de ciment}}{\text{Poids (ciment + sable + pierreille)}} \times 100.$$

N = nombre de kilogrammes de ciment par mètre cube de béton exécuté.

m = coefficient fonction de la grosseur maximum de la pierreille.

m₁ = coefficient fonction de la nature et de la composition granulométrique du sable ou poussier.

m₂ = coefficient dépendant de la composition de béton choisie.

k = coefficient tenant compte de la plasticité désirée pour l'exécution du béton.

Valeurs du coefficient k.

$k = 1$, pour bétons à damer avec soin à la main (n° 62).

$k = 1.10$ à 1.15 , pour bétons de consistance semi-plastique à plastique (n° 63).

$k = 1.25$ à 1.30 , pour bétons de consistance semi-fluide à fluide (n° 64).

Valeurs des coefficients $m - m_1 - m_2$.

GROSSEUR MAXIMUM de la pierreaille.	m	SABLE OU POUSSIER.	m_1	COMPOSITION DU BÉTON.	m_2
5 m/m	1,12	Poussier de porphyre 0,2 m/m (1)	1,00	A	1,00
10 m/m	1,04				
15 m/m	0,98	Poussier 0/5 m/m	0,96		
20 m/m	0,93	Sable fin + grenaille 2/5 (2)	0,90		
25 m/m	0,83			C	1,12
40 m/m	0,78	Sable du Rhin 0/2 m/m	0,83		
50 m/m	0,73	Sable du Rhin 0/5 m/m	0,80		

Remarque : Si les matériaux ne sont pas secs, il faut évidemment réduire en conséquence la quantité d'eau calculée.

Bétons de cailloux roulés. — Les proportions d'eau trouvées par les formules précédentes doivent être réduites d'environ 15 p. c.

RÉSISTANCES DES BÉTONS A, B, C

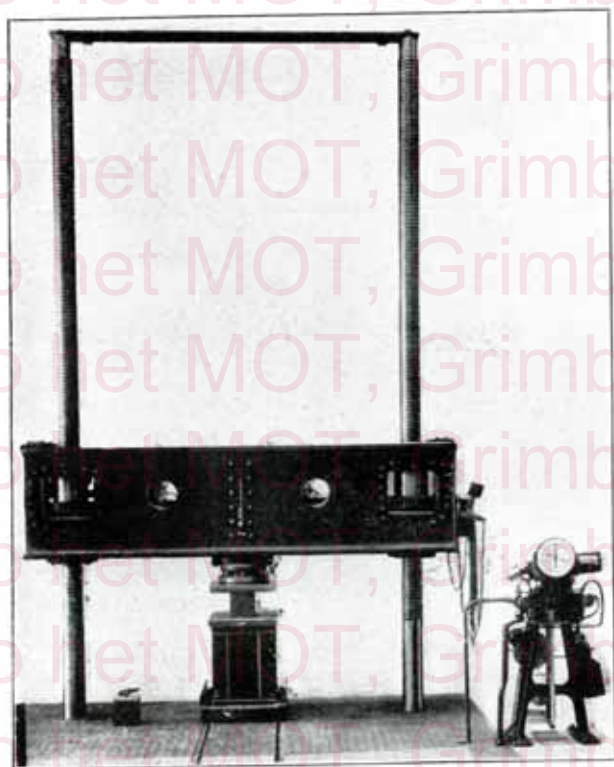
54. — La résistance des bétons pleins et bien compacts, tels que ceux qui répondent aux compositions A, B ou C, peut être admise comme dépendant uniquement de la richesse en ciment et de la quantité d'eau de gâchage.

Dans les formules qui ont été établies par plusieurs expérimentateurs, la résistance est fonction du rapport $\frac{C}{E}$ ou $\frac{E}{C}$, l'eau et le ciment s'y trouvant exprimés soit en poids, soit en volume.

(1) Ce poussier contient couramment 20 à 25 % d'éléments de finesse analogue à celle du ciment.

(2) Proportions de sable fin et de grenaille 2/5 m/m déterminées conformément aux règles de constitution des bétons A., B. ou C.

La formule la plus simple est celle (5) qui a été présentée par la Commission suisse du béton coulé. Elle est exacte pour des valeurs de $\frac{C}{E}$ comprises entre 1.00 et 2.50, c'est-à-dire pour les dosages couramment employés. A ces valeurs limites de $\frac{C}{E}$ correspondent, en effet,



Presse de 300 tonnes pour la détermination de la résistance à la compression des cubes de béton.

des bétons renfermant au mètre cube de 180 à 450 kilogrammes de ciment environ.

$$Z = K \left(\frac{C}{E} - K' \right) \text{ ou } Z = K \left(\frac{1}{W} - K' \right) \quad (5)$$

Z = Résistance à l'écrasement en Kg/cm^2 .

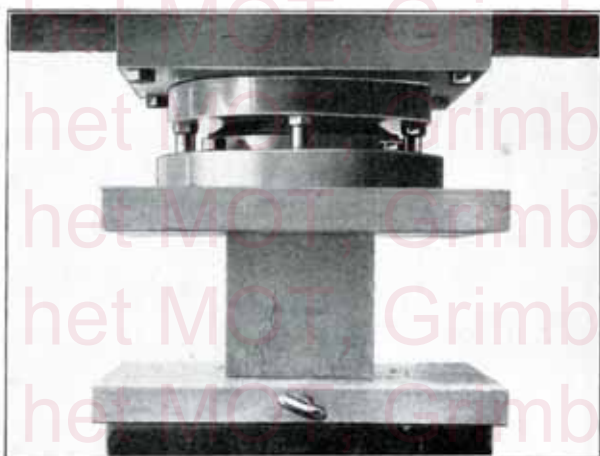
$$\frac{C}{E} = \frac{\text{Poids de ciment}}{\text{Poids d'eau}} = \frac{1}{W}$$

W étant calculé par une des formules (3) ou (4).

K et K' sont deux constantes qui sont déterminées lorsque sont définis les facteurs suivants :

- Nature et forme des matériaux employés ;
- Conditions de fabrication, d'exécution, de durcissement (à l'air sec ou humide ou sous eau, température, etc.) ;
- Dimensions des cubes soumis à l'écrasement ;
- Age des mortiers et des bétons ;
- *Qualité du ciment.*

BOLOMEY propose une loi (5') analogue à la précédente dans laquelle $K' = 0.5$.



Plateau à rotule de la presse de 300 tonnes concentrant l'effort de compression sur le cube soumis à l'essai.

Dans les conditions d'exécution de nos essais au laboratoire du Groupement, c'est-à-dire :

- Bétons de pierrailles concassées très dures, poussier ou sable du Rhin, de Meuse ou de carrière ;
- Ecrasement effectué sur cubes de 20 centimètres de côté (dimension généralement admise pour le prélèvement d'éprouvettes d'essai de béton sur chantier) ;
- Conservation à l'air humide (cas général dans notre pays pour les travaux en élévation) :

nous avons trouvé que la formule de Bolomey (5') permettait de déterminer la résistance des bétons, à environ, ± 10 p. c. près, pour :

$$1,00 \leq \frac{C}{E} \leq 2,50.$$

$$Z = K \frac{C}{E} - \frac{K}{2} \quad \text{ou} \quad Z = K \frac{1}{W} - \frac{K}{2} (5')$$

K = constante qui tient compte de la qualité du ciment employé et de l'âge du béton, les autres facteurs restant constants.

La valeur de K peut être déterminée en effectuant au préalable quelques essais de résistance sur des bétons caractérisés par diverses valeurs de W .

On peut admettre pour K les valeurs approximatives suivantes pour les trois catégories de ciment définies dans la première partie de cette brochure. (Ces valeurs s'entendent pour une conservation des bétons à l'air humide et à une température de 15° à 18° C). Elles ne

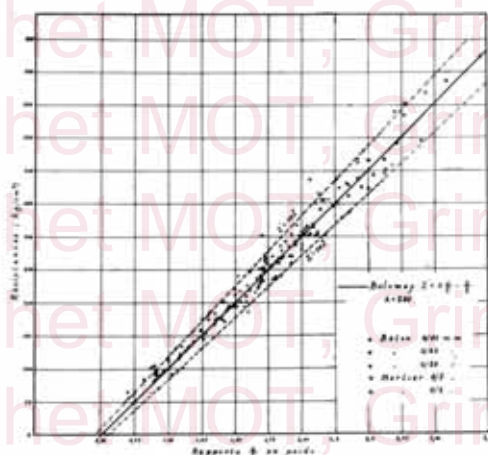


DIAGRAMME XIII.
Diagramme vérifiant, pour 140 bétons différents,
la loi de résistance en fonction du rapport $\frac{C}{F}$.

sont pas constantes pour une même catégorie de produits, les ciments présentant dans chaque classe des caractéristiques de résistance pouvant varier dans les limites indiquées au n° 20.

VALEUR APPROXIMATIVE DE K .

CATÉGORIE DE CIMENT.	K 3 JOURS.	K 7 JOURS.	K 28 JOURS.
Portland normal	—	—	120 à 200
Portland à haute résistance	—	—	200 à 260
Portland à durcissement rapide	120 à 180	200 à 260	260 à 320

La formule (5') peut être employée pour des valeurs de W comprises entre 0.40 et 1.00. Pour $W > 1.00$, elle donne des résistances trop faibles.

Elle montre toute l'importance qu'il faut attacher à la quantité d'eau de gâchage (n^{os} 6, 9, 34, 35) ; cette quantité influe sur la résistance au même titre que la richesse en ciment. Cette quantité d'eau doit tenir compte de l'humidité contenue dans le squelette.

Il est à remarquer que la quantité d'eau, qui entre dans le rapport W , tient compte implicitement de la granulométrie du béton, car elle est liée à la surface totale des éléments à mouiller.

De ce fait, les bétons A exigent moins d'eau que les bétons B et ceux-ci en demandent moins que les bétons C.

C'est ainsi que pour des bétons semi-plastiques, soigneusement damés, présentant à l'exécution une humidification équivalente et constitués de matériaux de même nature et de même granulométrie, on peut admettre, d'une façon générale, que les bétons A donnent des résistances de 5 à 10 p. c. supérieures à celles des bétons B et que ceux-ci offrent des résistances de 5 à 10 p. c. plus élevées que celles des bétons C.

QUELQUES EXEMPLES D'APPLICATION DE CES RÈGLES

55. — 1. — DOSAGE D'UN BÉTON COMPORTANT LES MATÉRIAUX SUIVANTS :

Macadam 20/40; plaquettes 5/20; poussier 0/2; ciment 17 p. c. en poids. Béton de consistance plastique.

Composition Bc (voir n^o 46).

40 m/m	D	100 %
20 m/m	$d = 0.5 \quad D$	68 %
5 m/m	$d = 0.125 \quad D$	42 %
2 m/m	$d = 0.05 \quad D$	35 %

Dosage correspondant :

En poids		En volume (1)
$100 - 68 = 32 \quad \%$	846 kgr.	20/40 600 l.
$68 - 42 + \frac{42 - 35}{2} = 29.5 \quad \%$	780 kgr.	5/20 600 l.

(1) La correspondance en volume résulte d'expériences faites au laboratoire. Elle suppose que les matériaux sont parfaitement secs.

$$\frac{42-35}{2} + 35-17 = 21.5 \% \quad 570 \text{ kgr.} \quad 0/2 \quad 390 \text{ l.}$$

$$\frac{17 \%}{100 \%} \quad 450 \text{ kgr.} \quad \text{ciment} \quad 450 \text{ kgr.}$$

Rapport « eau-ciment » :

$$W = 1.10 \times 0.78 \times 1.00 \times 1.07 \left(\frac{9.5}{17} + 0.05 \right) = 0.560 \text{ [Formule (3), n° 53]}$$

Richesse en ciment :

$$N = \frac{1.000}{\frac{37.3}{17} + 0.560 - 0.053} = 370 \text{ kgr. par mètre cube de béton}$$

[Formule (2), n° 52)]

Quantité d'eau de gâchage :

0.560 × 50 = 28 litres par gâchée comportant un sac de ciment de 50 kilogrammes (si tous les matériaux sont parfaitement secs).

2. — D_ _ SAGE D'UN B_ _ TON COMPOS_ _ DE :

Plaquettes 5/20; grenaille 2/5; sable très fin 0/0.4 millimètre; ciment 350 kilogrammes par mètre cube de béton. Composition Bc.
Béton damé à la main.

Rapport « eau-ciment » :

$$W = 1.00 \frac{0.93 \times 0.90 \times 1.07 \left(\frac{257}{350} + 0.063 \right)}{1 + 0.257 \times 0.93 \times 0.90 \times 1.07} = 0.581 \text{ [Formule (4), n° 53]}$$

Pourcentage de ciment :

$$C \% = \frac{37.3}{\frac{1000}{350} - 0.581 + 0.053} = 16 \% \text{ [Formule (1), n° 52]}$$

Composition Bc (n° 46) :

20 m/m	D	100 %
5 m/m	d = 0.25 D	51 %
2 m/m	d = 0.1 D	40 %
0.4 m/m	d = 0.02 D	27 %

Dosage correspondant :

En poids		En volume (l)
$100-51 = 49$	% 1,130 kgr.	5/20 870 l.
$51-40 + \frac{40-27}{2} = 17.5$	% 405 kgr.	2/5 310 l.
$\frac{40-27}{2} + 27-16.0 = 17.5$	% 405 kgr.	0/0.4 310 l.
	16.0 % 370 kgr.	ciment 370 kgr.
	100.00%	

Quantité d'eau de gâchage :

$0,581 \times 50 = 29$ l. par sac de ciment de 50 kilogrammes et pour des matériaux secs.

Si le sable fin, par exemple, contenait 10 p. c. d'eau, le dosage en eau par sac de ciment devrait être réduit de :

$$0.10 \times \frac{405 \times 50}{370} = \text{environ } 5.5 \text{ litres d'eau.}$$

La quantité d'eau de gâchage serait 23 l. 5 par sac de ciment.

Le dosage en volume de sable fin devrait être augmenté de 20 p. c. pour tenir compte du foisonnement dû à l'humidité (n° 38).

3. — MORTIER CONSTITUÉ DE :

Grenaille 2/5; sable du Rhin 0/2; ciment 16.25 p. c.

Mortier de consistance plastique.

Composition Ac (n° 46) :

$$\frac{5}{2} \quad D \quad 100 \% \\ d = 0.40 D \quad 51 \frac{0}{10}$$

Dosage correspondant :

En poids		En volume (l)
$100-51 = 49$	% 1,060 kgr. 2/5	820 l.
$51-16.25 = 34.75$	% 750 kgr. sable Rhin 0/2	490 l.
16.25 %	350 kgr. ciment	350 kgr.

Rapport « eau-ciment » :

$$W = 1.15 \times 1.12 \times 0.83 \times 1.00 \left(\frac{9.5}{16.25} + 0.05 \right) = 0.678$$

[Formule (3), n° 53]

(1) La correspondance en volume résulte d'expériences faites au laboratoire. Elle suppose que les matériaux sont parfaitement secs.

Richesse en ciment :

$$N = \frac{1.000}{\frac{37.3}{16.25} + 0.678 - 0.053} = 342 \text{ kgr. de ciment par mètre cube de mortier. [Formule (2), n° 52]}$$

Quantité d'eau de gâchage :

$0.678 \times 50 = 33 \text{ l. 9}$ par sac de ciment de 50 kilogrammes et pour des matériaux secs.

Si la grenaille et le sable contenaient respectivement 3 p. c. et 5 p. c. d'eau, le dosage en eau par sac de ciment devrait être réduit de :

$$0.03 \times \frac{1.060 \times 50}{350} + 0.05 \times \frac{750 \times 50}{350} = 4.53 + 5.37 = 9.9 \text{ litres.}$$

La quantité d'eau de gâchage serait de 24 l. d'eau par sac de ciment.

Les dosages en volume de la grenaille et du sable devraient être augmentés respectivement de 5 p. c. et de 18 p. c. pour tenir compte du foisonnement dû à l'humidité (n° 38).

4. — DOSAGE D'UN BÉTON DE GALETS DONT LE SQUELETTE N'EST CONSTITUÉ QUE PAR DEUX LOTS DE MATÉRIEAUX COMPORTANT DES GROSSEURS COMMUNES

Proportion de ciment : 15 p. c. en poids.

Composition : Bg.

Granulométrie des matériaux de rivière.

Diamètre <i>d</i> des ouvertures des tamis m/m.	0,2	0,5	1	2	5	7,5	10	15	20	25	30
Pourcentages passés à travers chaque tamis d'ouvertures <i>d</i> .											
Gravillon	7	20	40	50	65	75	90	95	100	100	100
Galets	0	0	0	0	3	10	20	54	69	85	96

Ces deux matériaux comportent des éléments de mêmes dimensions comprises entre 5 et 15 millimètres. Les proportions de gravillon et de galets doivent être calculées en partant d'une dimension comprise entre 5 et 15 millimètres et réalisant une séparation fictive entre les deux matériaux. Cette dimension se déterminera par tâtonnements.

A cette fin on peut procéder comme suit :

a) On considère que le squelette est constitué par trois catégories de grosseurs :

L'une comportant les éléments de dimensions communes 5/15 millimètres ;

Les deux autres étant formées par les éléments restants : 0/5 millimètres et 15/30 millimètres.

b) On admet que chacune de ces catégories peut être caractérisée par sa dimension moyenne (ou voisine de la moyenne).

- Élément fin 0/5, par $d = 2$ millimètres (y compris le ciment) ;
 — moyen 5/15, par $d = 10$ millimètres ;
 — gros 15/30, par $d = 20$ millimètres ;

et on recherche par tâtonnements quelle est la dimension a , — comprise entre 5 et 15 mm., — qu'il faut choisir en vue de réaliser un mélange de ciment, de gravillon et de galets dont les pourcentages d'éléments égaux ou inférieurs respectivement à :

2 m/m. 10 m/m. 20 m/m.

se rapprochent le plus de ceux qui sont donnés par la composition théorique Bg pour les valeurs de $\frac{d}{D}$ égales à :

$$\frac{2}{30} = 0.066 ; \quad \frac{10}{30} = 0.333 ; \quad \frac{30}{20} = 0.666.$$

C'est ainsi que pour $a = 7.5$ mm. ou $\frac{a}{D} = 0.250$, la composition Bg indique qu'il faut prendre 50 p. c. d'éléments égaux ou inférieurs à 7 mm. 5.

Les proportions de ciment, de gravillon et de galets qui en résultent sont :

Galets 5/30	50 %
Gravillon 0/15	50—15 % (ciment) 35 %
Ciment	15 %
	100 %

En choisissant successivement a égal à 5, 7.5 et 10 m/m., on obtient les proportions de galets et de gravillon renseignées au tableau suivant :

a m/m.	$\frac{a}{D}$	Pourcentages en poids des particules (a) déduits de la composition Bg.	Pourcentages en poids correspondants de	
			gravillon.	galets.
5	0,166	44	44—15 (ciment) = 29	100—44 = 56
7,5	0,250	50	50—15 (ciment) = 35	100—50 = 50
10	0,333	55	55—15 (ciment) = 40	100—40 = 60

Si l'on réalise le mélange qui correspond à $a = 7.5$ m/m, par exemple, on trouve, en se basant sur les compositions granulométriques du gravillon et des galets, que :

— Les éléments ≤ 2 m/m. se composent de :

15 % de ciment + 50 % des 35 % de gravillon,
soit $15 + 0.5 \times 35 = 15 + 17.5 = 32.5$ %.

— Les éléments ≤ 10 m/m. comportent :

15 % ciment + 0.90×35 % gravillon + 0.2×50 % galets,
soit $15 + 31.5 + 10 = 56.5$.

— Les éléments ≤ 20 m/m. comprennent :

15 % ciment + 35 % gravillon + 0.6×50 % galets,
soit $15 + 35 + 30 = 80$ %.

D'autre part, pour ces mêmes valeurs de d égales à :

2 m/m. 10 m/m. 20 m/m.

ou pour :

$\frac{d}{D} = 0.066 \quad 0.333 \quad 0.666$

La composition théorique Bg donne respectivement :

31.6 % ≤ 2 m/m. ; 53 % ≤ 10 m/m. ; 78.6 % ≤ 20 m/m.

En procédant pour $a = 5$ m/m. comme il a été fait pour $a = 7.5$ m/m., on obtient les résultats consignés ci-dessous :

Valeur de a réalisant la séparation fictive.	Pourcentages des matériaux de dimensions inférieures à		
	$d = 2$ m/m. ou $\frac{d}{D} = 0.066$	$d = 10$ m/m. ou $\frac{d}{D} = 0.333$	$d = 20$ m/m. ou $\frac{d}{D} = 0.666$
5 m/m.	$15 + 14.5 = 29.5$	$15 + 26.1 + 11.2 = 52.3$	$15 + 29 + 33.6 = 77.6$
Composition Bg . . .	31.6	53	78.6
7.5 m/m	$15 + 17.5 = 32.5$	$15 + 31.5 + 10 = 56.5$	$15 + 35 + 30 = 80$

Ce tableau montre que la valeur de a qui donne les proportions qui se rapprochent le plus de la composition théorique, est comprise entre 5 millimètres et 7.5 millimètres (1).

(1) Il n'est pas toujours possible de trouver des proportions fournissant un mélange qui s'accorde aussi bien avec la composition théorique. Dans ce cas, il faut s'efforcer de réaliser la correspondance de proportion des éléments fins avant tout, puis autant que possible celle des éléments moyens ; c'est au pourcentage d'éléments gros qu'il faut attacher le moins d'importance, si les circonstances ne permettent pas de l'obtenir exactement.

En adoptant $a = 6 \text{ m/m}$, on obtient $\frac{a}{D} = \frac{6}{30} = 0.20$.

Pour $\frac{d}{D} = 0.20$, la composition Bg donne 47 p. c.

On en déduit le dosage suivant pour le béton de gravier :

Galets :	$100 - 47 =$	53 %
Gravillon :	$47 - 15 =$	32 %
Ciment :		15 %
		<u>100 %</u>

Ce dosage répond à une composition qui se rapproche très bien de la courbe théorique Bg et qui est donnée ci-dessous.

d/D	1,00	0,83	0,80	0,666	0,60	0,5	0,4	0,333	0,25	0,20	0,166	0,10
Béton de gravier calculé . . .	97,9							54,4	44,3		37,4	
Bg	100	—	88	—	74	68	59	—	—	47	—	36
Béton de gravier calculé . . .		92		78,8		74						

d/D	0,08	0,066	0,06	0,05	0,04	0,033	0,20	0,0166	0,01	0,0066	0,005
Béton de gravier calculé . . .		31						21,4		17,2	15
Bg	33		31	30	28		23		20		16
Béton de gravier calculé . . .						27,8					

Quelques dosages et compositions

DES

Mortiers et des Bétons

d'après l'usage auquel on les destine et les matériaux dont on dispose

CES DOSAGES CONVIENNENT POUR DES MATÉRIAUX SECS

Les volumes de sable ou de poussier doivent être corrigés en tenant compte du pour cent d'humidité que ces matériaux contiennent

(Voir n° 38).

Les volumes de sable et de poussier s'entendent pour des MATÉRIAUX SECS

USAGE DU MORTIER	Dosages				Quantités entrant dans un mètre cube de mortier frais					OBSERVATIONS	
	ci- ment kg.	gre- naille 2/5 m/m litres	sable sec 0/2 à 0/3 m/m		sable fin sec litres	ci- ment kg.	gre- naille 2/5 m/m litres	sable sec 0/2 à 0/3 m/m			sable fin sec litres
			Rhin litres	pous- sier litres				Rhin litres	pous- sier litres		
I. — Mortier pour maçonneries.											Ce mortier peut convenir p ^r des constructions ne demandant pas de fortes résis- tances. Mais il est poreux, per- méable à la pluie. Avec ce faible dosage en ciment, il est préférable de faire usage de poussier. Le sable fin est em- ployé à défaut d'autre sable.
a) pour construc- tions peu im- portantes	300	—	1000	—	—	295	—	982	—	—	
	300	—	—	1000	—	300	—	—	1000	—	
	300	—	—	—	1000	300	—	—	—	1000	
b) pour ouvrages d'art : voûtes, piles, culées, murs de sou- tènement, fon- dations de ma- chines.	450	—	1000	—	—	422	—	936	—	—	Bonnes résistan- ces aux efforts mécaniques et aux intempé- ries. Imperméa- bilité suffisante d [*] bien des cas. Sable fin em- ployé à défaut d'autre sable.
	450	—	—	1000	—	413	—	—	918	—	
	450	—	—	—	1000	425	—	—	—	945	
c) pour ouvrages demandant une très bonne imperméabi- lité.	600	—	1000	—	—	528	—	880	—	—	Mortiers don- nant de grandes résistances en même temps qu'une grande imperméabilité.
	600	—	—	1000	—	515	—	—	858	—	
	600	—	—	—	1000	535	—	—	—	892	
II. — Mortier pour enduits.											Très grande im- perméabilité. Assure l'étan- chéité. L'exécu- tion de ces en- duits doit être effectuée avec beaucoup de soin en vue d'éviter leur fis- suration.
a) Rejointoiem- ent, chape de voûte, etc.	700	—	1000	—	—	600	—	856	—	—	
	700	—	—	1000	—	580	—	—	828	—	
	700	—	—	—	1000	600	—	—	—	856	
b) Enduit de pa- rement, de ré- servoirs d'eau.	900	—	1000	—	—	713	—	793	—	—	
	900	—	—	1000	—	670	—	—	743	—	
	900	—	—	—	1000	716	—	—	—	795	

57. — II. — BÉTONS DE GRENAILLE CONCASSÉE (composition A)

Ces dosages s'entendent pour des MATÉRIAUX SECS

Les volumes de sable ou de poussier doivent être corrigés en tenant compte du p. c. d'humidité que ces matériaux contiennent (voir n° 38).

USAGE DU MORTIER	Dosages (l)					Quantités entrant dans un mètre cube de mortier frais (l)					OBSERVATIONS
	ci- ment kg.	gre- naille 2/5 m/m litres	sable sec 0/2 à 0/3 m/m		sable fin sec litres	ci- ment kg.	gre- naille 2/5 m/m litres	sable sec 0/2 à 0/3 m/m		sable fin sec litres	
			Rhine litres	pous- sier litres				Rhine litres	pous- sier litres		
I. — Revêtements d'usure :											Ces revêtements sont généralem ^t exécutés av. de la grenaille 2/5 m/m de porphy- re, de quartzite ou de grès dur. Pr des revêtem ^{ts} ou d ^e dalles dont l'épaisseur est supérieure à 5 cm., on peut utiliser de la gre- naille 2/8 à 2/10 millimètres.
Couche supé- rieure servant de pavémen p ^t ateliers, écu- ries, étables, granges, gara- ges, etc.	600	800	350	—	—	570	760	332	—	—	
Briques ou dalles de pavémen exécutées à la main.	600	750	—	400	—	538	672	—	359	—	
	600	950	—	—	250	557	882	—	—	232	
II. — Poteaux et panneaux de clôture en mor- tier de ciment, bacs, mangeoi- res, etc.	475	800	400	—	—	450	757	379	—	—	Lorsque la plus petit ^e dimension des pièces est supérieure à 6 cm., on peut mettre en œuvre de la grenaille de 2/8 à 2/10 m/m
	475	750	—	450	—	440	704	—	422	—	
	475	900	—	—	300	464	879	—	—	293	
III. — Blocs et pièces diverses moulées, de fai- ble épaisseur et demandant des résistances moindres, ex. : tronçons de ri- goles, bordures de jardin, récipients non étanches, etc.	350	800	500	—	—	326	745	465	—	—	Si l'épais ^s des pièces s'y prête, la dimension de la grenaille peut aller jusqu'à 8 et 10 m/m.
	350	750	—	600	—	300	643	—	515	—	
	350	900	—	—	450	334	858	—	—	429	

(1) Les déterminations de proportions en volume ont été faites à l'aide de mortiers constitués avec les matériaux suivants :

Grenaille de porphyre 2/5 m/m pesant	131	kilogr.	à l'hectolitre	} mesures faites sans tassement sur matériaux secs.
Poussier de porphyre 0/2 m/m	id.	145	id.	
Sable du Rhin 0/2 m/m	id.	150	id.	
Sable très fin 0/0,35 m/m	id.	135	id.	

III. — BÉTONS DE PIERRAILLES CONCASSÉES (composition B)

Ils s'entendent pour des MATÉRIAUX SECS.

Les volumes de sable ou de poussier doivent être corrigés en tenant compte du p. c. d'humidité que ces matières contiennent (voir n° 38).

Bétons 0/40 millimètres

Bétons 0/40 millimètres														
USAGE DU BÉTON	DOSAGE (1)						QUANTITÉS DE MATIÈRES par mètre cube de béton frais (1)						Observations	
	Ciment	Pierraille en litres		Sables ou poussières secs en litres			Ciment	Pierraille en litres		Sables ou poussières secs en litres				
9/10 du poids total des matières		20/40	5/20	Grenaille 2/5	Sable ou poussier 0/2 à 0/3	Sable fin	Kg.	20/40	5/20	Grenaille 2/5	Sable ou poussier 0/2 à 0/3	Sable fin		
Kg														
Pour revêtement de route exé- cuté en une couche.	16,6	300	410	410	—	270	—	372	505	513	—	330 p.	—	La grosseur maxim ^m de la pierraille est en rap- port avec les dimensions des pièces à exécuter.
			—	—	—	—	—	—	392	528	537	—	347 s.	
Fondations mas- sives et impor- tantes p ^r ma- chines.	14,5	300	410	350	195	—	165	382	517	452	246	—	213	Elle peut être supérieure à 40m/m. mais les propor- tions des di- verses gros- seurs doit être modifi- ées en les déterminant à l'aide d'une des compositions types A, B, C, que l'on désire réali- ser.
			—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
Couche infé- rieure pour routes.	13,5	300	470	470	—	340	—	325	503	498	—	366 p.	—	Pour les revê- tements d'u- sure, le pous- sier de por- phyre ou de toute autre roche très dure est pré- férable au sable fin.
			—	—	—	—	—	—	330	520	517	—	372 s.	
Fondations mas- sives peu im- portantes et peu soumises à vibrations.	11,75	300	470	400	225	—	225	329	518	437	243	—	243	—
			—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
Fondations mas- sives agissant par leur poids et ayant sur- tout un rôle de répartition des efforts.	11	300	510	500	—	375	—	303	513	510	—	380 p.	—	—
			—	—	—	—	—	—	310	525	521	—	389 s.	
			510	425	240	—	260	308	518	433	245	—	262	
			—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
			585	575	—	460	—	264	514	506	—	405 p.	—	
			—	—	—	—	—	—	267	521	512	—	410 s.	
			685	490	270	—	325	265	517	433	239	—	287	
			—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
			620	620	—	505	—	247	512	507	—	418 p.	—	
			—	—	—	—	—	—	248	513	508	—	420 s.	
			620	525	295	—	360	250	518	436	236	—	300	
			—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

(1) Voir note I à la page 59.

Bétons 0/25 millimètres

USAGE DU BÉTON	DOSAGE (1)						QUANTITÉS DE MATIÈRES par mètre cube de béton frais (1)						Observations		
	Ciment		Pieraille en litres		Sables ou poussières secs en litres		Ciment		Pieraille en litres		Sables ou poussières secs en litres				
	%	du poids total des matières	Kg.	10/25	—	Grenaille 2/5	Sable ou poussier 0/2 à 0/3	Sable fin	Kg.	10/25	—	Grenaille 2/5		Sable ou poussier 0/2 à 0/3	Sable fin sec
Revêtements pour trottoir ou couche su- périeure pour route, poteaux réservoirs d'eau, plate- forme de toi- ture.	17	300	600	—	240	240	—	380	767	—	300	304 p.	—	On obtient d'excellent bé- tons en utili- sant comme éléments fins un mélange par parties égales de sa- ble de rivière et de poussier.	
			660	—	310	—	175	387	782	—	305	310 s.	—		
								388	785	—	397	—	229		
Béton armé : ouvrages su- jets à vibra- tions, founda- tions de ma- chines.	14.75	300	700	—	275	310	—	335	783	—	306	344 p.	—		
								342	800	—	312	350 s.	—		
			700	—	350	—	255	336	785	—	395	—	286		
Murs en élé- vation, parois de silos, couche supérieure p ^r trottoir en deux couches.	13.75	300	750	—	295	350	—	308	780	—	300	361 p.	—		
								315	790	—	307	370 s.	—		
			750	—	385	—	290	313	793	—	396	—	305		
Fondations, cou- che inférieure pour aires bé- tonnées de lo- caux, allées, promenades, etc.	12	300	860	—	335	425	—	262	750	—	293	372 p.	—		
								272	780	—	304	385 s.	—		
			860	—	435	—	365	272	780	—	395	—	331		

(1) Pour les poussières, sables et pierres, les dosages sont donnés en volume comme cela se pratique habituellement.

Ces dosages en volume correspondent à des poids de matières répondant aux mesures suivantes :

20/40 porphyre 140 kilogrammes à l'hectolitre ;

10/25 id. 132 id. id.

5/20 id. 130,5 id. id.

2/5 id. 131 id. id.

Sable du Rhin et poussier 0/2 : en moyenne 147.5 à l'hectolitre.

Sable fin 0,40 : 136 à l'hectolitre.

Ces déterminations s'entendent pour des matières sèches non tassées.

Bétons 0/20 millimètres

USAGE DU BÉTON	DOSAGE (1)						QUANTITÉS DE MATIÈRES par mètre cube de béton frais (1)						Observations	
	Ciment		Pierraille en litres		Sables ou poussières secs en litres		Ciment		Pierraille en litres		Sables ou poussières secs en litres			
	% du poids total des matières	Kg.	5/20	—	Grenaille 2/5	Sable ou poussier 0,2 à 0,3	Sable fin	Ciment	5/20	—	Grenaille 2/5	Sable ou poussier 0,2 à 0,3		Sable fin
Revêtement p ^r trottoirs, allées, couche supé- rieure p ^r trot- toirs ou rou- tes, poteaux, réservoirs d'eau, auges, toitures en béton.	17.4	300	710	—	—	340	—	378	900	—	—	428 p.	—	
								392	930	—	—	444 s.	—	
			630	—	230	—	220	390	819	—	302	—	282	
Béton armé : ouvrages sujet ^s à vibrations, fondations p ^r machines.	15	300	810	—	—	425	—	325	877	—	—	463 p.	—	
								332	895	—	—	473 s.	—	
			725	—	270	—	285	329	793	—	294	—	314	
Parois de silos, murs en éléva- tion.	14	300	880	—	—	470	—	305	895	—	—	480 p.	—	
								312	915	—	—	491 s.	—	
			790	—	290	—	325	311	809	—	297	—	336	
Fondations peu importantes p ^r machin ^s , mass. non soumises à vibrations. Couche infér ^{re} p ^r aire béton- née de locaux, trottoirs, al- lées, etc.	12.25	300	1000	—	—	570	—	262	873	—	—	498 p.	—	
								270	900	—	—	513 s.	—	
			900	—	330	—	400	271	812	—	296	—	362	

(1) Voir note 1 page 101.

IV. — BÉTON DE GRAVILLON (composition A)

Ces dosages s'entendent pour des **MATÉRIAUX SECS**.

Les volumes de sable ou de poussier doivent être corrigés en tenant compte du p. c. d'humidité que ces matières contiennent (voir n° 38).

USAGE DU BÉTON	Dosages (1)				Quantités entrant dans un mètre cube de mortier frais (1)				OBSERVATIONS
	Ciment	Gra- villon	Sable de rivière	Sable fin	Ciment	Gra- villon	Sable de rivière	Sable fin	
	— kg.	2 5 m/m litres	0/2 à 0/3 m/m litres	— litres	— kg.	2/5 m/m litres	0/2 à 0/3 m/m litres	— litres	
Mortiers pour revêtements d'usure, etc.	600	710	310	—	580	680	300	—	Pour des revête- ments ou des dalles dont l'é- paisseur est supérieure à 5 cm., on peut utiliser du gra- villon 2/8 à 2/10 mm. Il en est de mé- me pour toute pièce moulée dont l'épaisseur est supérieure à 5 cm.
	600	825	—	230	575	780	—	220	
Poteaux et pan- neaux de clô- ture.	475	695	400	—	475	695	400	—	
	475	800	—	280	470	790	—	277	
Blocs et pièces diverses mou- lées.	350	720	455	—	350	680	427	—	
	350	830	—	390	335	795	—	374	

(1) La détermination des proportions en volume est faite en partant des poids suivants relevés à l'hectolitre pour des matériaux secs et non tassés :

Gravillon 2/5	150 kg.
Sable de rivière	150 kg.
Sable fin	135 kg.

V. — BÉTONS DE GALETS (composition B)

Ces dosages se rapportent à des MATERIAUX SECS

Les volumes de sable doivent être corrigés en tenant compte du p. c. d'humidité que les matériaux contiennent (voir n° 38).

USAGE	Dosages (l)					Quantités de matières par m ³ de béton frais					OBSERVATIONS	
	Ciment		Gravier	Gravillon 2/5	Sable de rivière 0/2 à 0/3 mm.	Sable fin	Ciment	Gravier	Gravillon 2/5	Sable de rivière		Sable fin
	p.c.	kg.										
BÉTON 0/30 A 0/40 M/M.												
I. Revêtements de routes exécutés en une couche.	15,9	300	750 5/40	—	240	395	985 5/40	—	316	—	—	La grosseur maximum du gravier est en rapport avec les dimensions des pièces à exécuter.
		300	700 5/40	165	—	140	398 925 5/40	220	—	185	Elle peut être supérieure à 40 m/m., mais les proportions des diverses grosseurs doivent être modifiées en les déterminant à l'aide d'une des compositions type A, B ou C, que l'on désire réaliser.	
		300	800 5/40	—	—	200	390 1033 5/40	—	—	260		
II. Fondations importantes p ^r machines. Béton armé.	14,9	300	825 5/30	—	310	335	920 5/30	—	346	—	—	
		300	750 5/30	230	—	190	335 875 5/30	256	—	212		
		300	875 5/30	—	—	270	325 960 5/30	—	—	293		
III. Fondations massives peu importantes. Couche inférieure pour routes.	11,5	300	1050 5/30	—	450	270	945 5/30	—	404	—	—	
		300	960 5/30	285	—	300	265 847 5/30	250	—	265		
		300	1125 5/30	—	—	415	256 957 5/30	—	—	357		
BÉTON 0/25 A 0/20 M/M.												
I. Revêtements pour trottoirs, allées, couche supérieure p ^r route, poteaux réservoirs, plate-formes de clôture, etc.	17	300	660 5/25	—	260	405	880 5/25	—	350	—	—	Pour les revêtements d'usure le sable de rivière est meilleur que le sable fin.
		300	590 5/25	225	—	150	410 805 5/25	310	—	205		
		300	675 5/25	—	—	220	400 900 5/25	—	—	294		
	17,4	300	620 5/20	—	295	400	825 5/20	—	395	—		
		300	560 5/20	230	—	165	405 760 5/20	320	—	222		
II. Béton armé.	14,75	300	690 5/20	—	—	250	400 920 5/20	—	—	333	—	
		300	800 5/20	—	335	337	895 5/20	—	375	—		
		300	685 5/20	265	—	230	330 755 5/20	292	—	253		
III. Fondat. peu importantes, couches infér. p ^r routes, trottoirs, allées, etc.	12,0	300	860 5/20	—	—	345	320 915 5/20	—	—	368	—	
		300	995 5/20	—	415	265	870 5/20	—	366	—		
		300	800 5/20	330	—	330	265 710 5/20	292	—	300		
		300	1020 5/20	—	—	462	260 880 5/20	—	—	400	—	

(1) La détermination des proportions en volume est faite en partant des poids suivants relevés à l'hectolitre pour des matériaux secs et non tassés :

Gravier 5/40
Gravier 5/30
Gravillon 2/5

165 kg.
155 kg.
150 kg.

Sable de rivière
Sable fin

150 kg.
135 kg.

IV. — Fabrication et mise en œuvre des mortiers et des bétons.

Les bétons et les mortiers ont les qualités que leur donne l'exécution. Une fabrication ou une mise en œuvre défectueuses font perdre tout le fruit d'un dosage parfait et toutes les qualités d'un ciment excellent.

FABRICATION DES MORTIERS ET DES BÉTONS

58. — Les matières ayant été dosées suivant les indications données précédemment, la fabrication des mortiers et des bétons doit comporter deux opérations :

1^o *Le mélange intime des matières à sec;*

2^o *Leur malaxage avec addition d'eau.*

Le mélange à sec est indispensable, car c'est dans cet état de siccité que les constituants sont amenés à l'homogénéité et l'intimité nécessaires.

Ces opérations s'exécutent soit à bras, soit mécaniquement.

FABRICATION A BRAS

59. — Sur une aire propre, unie, imperméable (surface dallée, plancher recouvert de tôles), les matériaux sont disposés en couches se superposant, les plus gros éléments à la partie inférieure, les plus fins à la partie supérieure. Suivant l'importance de la gâchée, deux ou trois séries de couches peuvent ainsi se recouvrir. Cette façon d'opérer aide déjà à l'homogénéité du mélange. Le tas ainsi formé est retourné à la pelle jusqu'à ce qu'il présente une teinte parfaitement uniforme, indice d'un bon mélange à sec.

On recommande de former le tas en une couronne, au centre de laquelle est déversée l'eau nécessaire au gâchage. On peut également verser l'eau progressivement sur le tas, à l'aide d'un arrosoir ou d'une lance à pomme d'arrosoir, pendant que le mélange continue à s'exécuter à la pelle et au rabot pour les mortiers, à la pelle et à la griffe ou croc

à trois ou quatre dents pour les bétons. L'arrosage lent a l'avantage d'humecter progressivement les matières sans délayer le sable ni la pierre.

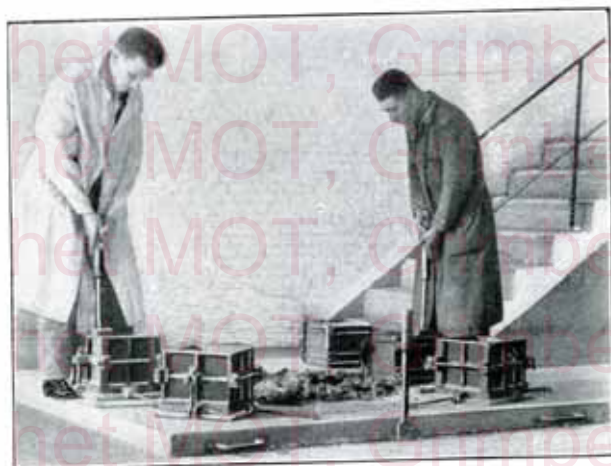
Le procédé de la couronne convient spécialement pour les mortiers



Plate-forme pour la fabrication du béton.

tandis qu'il n'est pas recommandable pour les bétons; ceux-ci contiennent généralement une proportion insuffisante d'éléments fins pour rendre cette couronne imperméable et l'eau s'écoule au travers de celle-ci.

Le mouillage progressif est le meilleur pour les bétons.



Remplissage des moules et damage des cubes de béton destinés à l'essai de compression.

La quantité d'eau est déterminée par un essai préalable et en tenant compte des indications données à ce sujet (n° 53), de façon à amener mortiers ou bétons à l'état de plasticité désirée. *Elle doit être strictement réglée et surveillée au cours de la fabrication.* Elle doit varier suivant l'état d'humidité du squelette et suivant les circonstances atmosphériques.

Le malaxage est terminé lorsque la masse est uniformément mouillée dans toutes ses parties.

FABRICATION MÉCANIQUE

60. — La fabrication mécanique donne le meilleur rendement en quantité et en qualité. En qualité, parce qu'elle assure automatiquement un malaxage d'une grande régularité.

Quel que soit l'appareil employé, qu'il s'agisse de mortiers ou de bétons, le mélange à sec doit toujours s'effectuer avant de procéder à l'humidification des matières. Quand l'appareil ne permet d'exécuter que le malaxage humide, il faut effectuer au préalable à la main le mélange à sec. Même si l'appareil permet ce mélange à sec avant toute addition d'eau, comme c'est le cas pour la plupart des bétonnières actuellement en usage, il est encore recommandé d'opérer un mélange grossier à sec, avant de déverser les matières dans la machine.

Si cette dernière recommandation n'est pas souvent suivie sur les chantiers, il conviendrait qu'elle le fût toujours dans les ateliers de fabrication de produits finis pour lesquels on doit mettre tout en œuvre en vue d'assurer une grande régularité de qualité.

Les appareils utilisés sont de divers modèles; ceux qui conviennent pour les bétons et les mortiers au sable gros, opèrent le malaxage sans corroyage des matériaux. En principe, ils réalisent le mélange par l'une des deux façons suivantes :

— Les matières sont malaxées par des palettes se mouvant dans leur masse et sont entraînées progressivement vers un orifice de déversement où le mortier ou béton est recueilli dans des wagonnets, des brouettes, etc.

— Dans d'autres appareils, les plus répandus, les matières sont reçues dans un cylindre ou dans des coquilles doubles de forme sphérique ou tronconiques tournant autour de leur axe. Les chutes successives des matériaux entraînés par la force centrifuge suffisent à opérer le mélange et le malaxage.

Suivant le type d'appareil, la fabrication est continue ou intermittente.

Pour les mortiers à sables moyens et fins ou mélangés de scorie, de laitier, de briques pilées ou de trass, l'emploi du broyeur à meule est préférable parce qu'il effectue un broyage et une compression énergétique des matières, ce qui amène une réduction de la quantité d'eau nécessaire, donne aux mortiers plus de compacité et de résistance tout en facilitant la mise en œuvre.

Pour les bétons, la durée du mélange et du malaxage mécaniques ne doit pas descendre au-dessous de une minute et demie, dont une demi-minute de mélange à sec.



Bétonnière en service sur un chantier de route en béton.

Pour les mortiers, il convient de prolonger la durée de l'opération jusque trois à cinq minutes.

Des essais nombreux ont montré qu'un malaxage plus long donne encore des meilleurs résultats. Les durées données ci-dessus sont des minima qui se rapprochent de ceux qu'on peut admettre pratiquement.

MISE EN PLACE DU BETON

61. — Les mortiers et les bétons doivent être mis en œuvre aussitôt après leur fabrication et d'autant plus vite que le ciment est à prise plus rapide, que le dosage est plus riche en ciment, que la quantité d'eau de gâchage est plus faible et que la température est plus élevée (n° 5, 6).

Si le béton doit être transporté sur une distance assez grande, il y a lieu de craindre, par suite du transport, la séparation des matériaux par ordre de grosseur et de densité, ce qui devrait nécessiter un malaxage rapide à la main avant la mise en place du béton. La durée de ces opérations ne doit pas dépasser le délai de commencement de prise du ciment.

Le regâchage des mortiers et des bétons ne doit jamais être pratiqué, car il contrarie les phénomènes de prise et détruit les cristallisations commencées (n° 5).

Dans la mise en œuvre *des mortiers de maçonnerie* il est nécessaire de gorger d'eau les briques et pierres poreuses naturelles ou artificielles au moment de leur pose dans la maçonnerie, afin d'éviter qu'elles n'absorbent l'eau du mortier et ne fassent ainsi perdre toute adhérence au joint (n° 9).

Les mortiers à sable gros (couche d'usure, dalles, pièces moulées, etc.) et les bétons demandent, suivant leur consistance, un damage plus ou moins énergique. *L'exécution du damage a une influence capitale sur la compacité et la résistance des bétons.* Suivant la façon dont il est effectué, un même béton peut donner des résistances variant entre elles de 30 p. c. et même 50 p. c. On ne peut donc assez attirer l'attention sur l'importance qu'il faut attacher à cette opération, surtout si les bétons sont à consistance simplement humide et que l'on désire obtenir de fortes résistances à la compression et à l'usure en même temps qu'une bonne imperméabilité.

MORTIERS ET BÉTONS DE CONSISTANCE HUMIDE

62. — Ils exigent un damage énergique par couches successives.

L'épaisseur de ces couches varie d'après la grosseur maximum de la pierraille et les dimensions des pièces. Elle est de quelques centimètres pour les mortiers à sable gros, de 5 à 10 centimètres pour les bétons dont les pierrailles ne dépassent pas 30 millimètres, et de 10 à 25 centimètres pour ceux dont la pierraille la plus grosse va de 30 à 60 millimètres.

Pour le béton armé l'épaisseur varie en plus avec le nombre et la disposition des armatures.

Le damage doit être tel qu'il enchâsse parfaitement tous les matériaux et que le mortier reflue légèrement à la surface avec une mince pellicule d'eau. Ces bétons contiennent donc peu d'eau, sont assez raides mais donnent, s'ils sont bien exécutés, les plus fortes résistances. Leur damage peut s'effectuer à la main, ou mieux mécaniquement.

MORTIERS ET BÉTONS DE CONSISTANCE PLASTIQUE

63. — Ils doivent également être mis en place par couches successives, mais le damage, quoique encore indispensable, peut être moins énergique. On le considère comme terminé dès que mortier et eau refluent à la surface du béton en une couche suffisamment épaisse.

MORTIERS ET BÉTONS DE CONSISTANCE FLUIDE (OU COULÉS)

64. — Ils sont avantageusement mis en œuvre en grande masse sous de fortes épaisseurs. On peut également les utiliser, moyennant quelques précautions, pour le moulage de pièces d'épaisseur suffisante et pour l'exécution du béton armé si le nombre et la disposition des



Béton coulé. — Elevation du béton par monte-charge et déversement par goulottes.

armatures le permettent. Il suffit d'aider au bon rangement des matériaux et de régaler les surfaces de chaque couche; les matériaux se tassent d'eux-mêmes dans la masse fluide, par suite de leur propre densité. La grande épaisseur des couches est favorable au tassement grâce à la pression de leur propre poids.

Ces bétons fluides sont généralement transportés par des moyens mécaniques depuis la bétonnière jusqu'au coffrage. On utilise des wagonnets à benne ou des monte-charges desquels le béton est déversé dans les goulottes de coulage. C'est dans ces dernières que par gravité, le béton glisse dans sa pâte de mortier jusqu'à l'endroit de sa mise en place.

La composition granulométrique des mélanges doit être telle que

le béton garde son homogénéité au cours de ces transports et déplacement. S'il n'en est pas ainsi, à son arrivée à l'endroit de mise en œuvre, il est nécessaire de remanier le béton sur un petit chantier-relai, afin de lui rendre son homogénéité avant de le déverser dans les coffrages. C'est généralement l'excès d'eau qui produit la séparation des matériaux, en enlevant toute adhérence à la pâte de mortier. C'est également cet excès d'eau qui réduit outre mesure et sans nécessité la résistance des bétons coulés.

Ce procédé fait gagner du temps et de la main-d'œuvre; il supprime les graves dangers d'un damage mal exécuté, mais la grande



Béton coulé. — Dispositif analogue à celui de la figure précédente.

quantité d'eau que ces bétons demandent ralentit le durcissement et réduit les résistances dans une proportion importante (n° 9). On peut remédier à ces inconvénients par une augmentation correspondante de la richesse en ciment (voir n° 54).

MORTIERS ET BÉTONS A LA MER

65. — Les mortiers et bétons à exécuter à la mer doivent être riches en ciment additionné d'une matière pouzzolanique.

Dans notre pays c'est généralement le trass qui est utilisé à cette fin.

La compacité et l'imperméabilité des mortiers et des bétons sont les conditions primordiales de leur bonne résistance à l'action de l'eau de mer (n° 12).

Les dosages les plus recommandés sont les suivants :

Pour les mortiers :

Par mètre cube de sable : 400 à 450 kilogrammes de ciment additionnés de 150 à 200 kilogrammes de trass.

Pour les bétons en grande masse :

Par mètre cube de béton : 250 à 300 kilogrammes de ciment additionnés de 80 à 100 kilogrammes de trass.

Pour le béton armé :

La quantité de ciment nécessaire pour obtenir les résistances désirées, avec addition de 25 à 30 p. c. de trass par rapport au poids du ciment.

Le trass, ou toute autre matière pouzzolanique, doit être moulu finement et mélangé intimement au ciment à sec avant que soit effectué le mélange avec le squelette du mortier ou du béton. De plus, ce squelette doit être d'une composition granulométrique permettant une bonne plasticité ainsi qu'une bonne compacité. Du reste l'addition de fines poussières de trass contribue à la réalisation de ces deux dernières conditions.

Les mortiers et les bétons doivent durcir le plus longtemps possible en dehors du contact de l'eau de mer, afin de permettre la carbonatation de la chaux libre en surface. Il faut en tous cas éviter le délavage des mortiers et des bétons frais par l'eau de mer, et surtout leur exposition aux alternatives du flux et du reflux.

Pour les bétons on recommande unamage énergétique et l'utilisation de coffrages en bois rabotés ou en tôles d'acier afin d'obtenir des surfaces lisses.

Il faut éviter autant que possible les joints de reprise. S'ils doivent exister, il convient, à chaque arrêt du bétonnage, de protéger les surfaces des joints contre le délavage et la formation de laitance. Si de telles précaution ne peuvent être prises, il faut nettoyer à vif les joints avant de poser la couche suivante de béton, afin de supprimer toute cause de manque de liaison entre les deux parties.

Enfin, pour les ouvrages en béton armé, l'épaisseur du béton qui sépare les armatures de la paroi du béton en contact avec l'eau de mer doit atteindre au moins 5 à 6 centimètres.

MORTIERS ET BÉTONS A LA GELÉE

66. — *Jusqu'à une température de -1° à -2° C.* les travaux peuvent s'exécuter comme d'habitude (n^{os} 6 et 9). Cependant si l'on désire garder une rapidité de prise et de durcissement normale, on peut avoir recours aux moyens suivants :

- Augmenter le dosage en ciment, si le mortier ou le béton est assez pauvre en ciment ;
- Diminuer la quantité d'eau de gâchage ;
- Protéger les travaux contre le froid.

Pour des températures plus basses allant jusqu'à -10° C., on évite la congélation de l'eau de gâchage en lui additionnant les sels suivants :

- Du sel marin, 5 à 8 p. c. du poids d'eau ; ce sel a l'inconvénient de réduire un peu les résistances. Dans les mortiers il provoque en plus des efflorescences qui apparaissent à la surface des maçonneries ;
- Du carbonate de soude, dans les mêmes proportions que le sel marin, mais il produit également des efflorescences ;
- Du chlorure de calcium. L'emploi de ce sel est à recommander.

Des essais effectués par M. le professeur Duff Abrams, de Chicago, ont montré que l'on pouvait en admettre des additions de 2 à 4 p. c. du poids de ciment. Outre que ce sel abaisse le point de congélation de l'eau de gâchage, il présente l'avantage d'activer le durcissement et d'accroître les résistances au cours des premières semaines qui suivent la fabrication, et cela sans danger pour les résistances finales des bétons.

Dans les travaux suffisamment importants à exécuter au cours de l'hiver, on peut également prendre des dispositions permettant le réchauffement des matériaux et de l'eau de gâchage.

Après leur mise en place, les mortiers et les bétons doivent être protégés contre les atteintes du froid au cours de la prise et des premiers jours de durcissement. A cette fin on les recouvre de paille ou de bâches. Parfois même, lorsque l'ouvrage s'y prête, on recouvre la construction d'une toiture légère et mobile sous laquelle on maintient, à l'aide de foyers, une température plus clémente permettant le travail dans des conditions normales.

CONDITIONS DE DURCISSEMENT — RETRAIT FISSURATION

67. — Si d'une part l'excès d'eau de gâchage est nuisible à la prise et au durcissement, d'autre part la dessiccation trop rapide est une des causes principales de la mauvaise tenue des mortiers et des bétons.

Elle produit non seulement des couches superficielles friables, mais dans les enduits et les revêtements, elle provoque un retrait plus accentué et de nombreuses fissures désagréables à l'œil et funestes à la bonne résistance des mortiers et des bétons aux intempéries.

Humidifier pendant un temps suffisamment long est la seule règle



Route en béton exécutée par dalles successives.

à observer pour éviter ces inconvénients (n° 9). A cette fin, on recouvre le mortier ou le béton, soit de toiles abondamment arrosées, soit de sable ou de terre humides, si la position du revêtement le permet. Une couche de chlorure de calcium maintient également bien l'humidité et est recommandée pour les revêtements de chaussée.

Si ces moyens ne peuvent être employés, il faut y suppléer par un arrosage fréquent des surfaces exposées.

Une telle humidité doit être entretenue depuis le début du durcissement et pendant deux à quatre semaines.

La bonne exécution des enduits et revêtements évite la fissuration tout autant que les mesures prises pour empêcher une dessiccation trop rapide.

Les enduits doivent s'exécuter en couche mince fortement battue à la taloche. Chaque couche est appliquée sur la précédente après que celle-ci a commencé à durcir.

Les revêtements de route et, en général, les aires bétonnées demandent une exécution par bandes ou plaques successives de quelques mètres de largeur. Ces bandes ou grandes dalles se fabriquent habituellement en laissant entre elles un intervalle de mêmes dimensions. Ce n'est qu'après le durcissement des premières que l'on exécute les dalles intermédiaires en ménageant entre elles un joint sur toute l'épaisseur, ce qui limite les effets du retrait. Pour les routes les bandes ont de 5 à 10 mètres de largeur.

Les murs et charpentes de grande longueur se constituent également par parties accolées avec joints de retrait. La longueur de chaque partie peut varier de 10 à 20 mètres.

Ces joints ne sont pas seulement nécessaires pour prévenir les fissures de retrait, mais ils permettent également le jeu des dilatations et des contractions sous l'effet des variations de température et des alternatives de sécheresse et d'humidité. Ils doivent donc être maintenus libres même après complet durcissement du béton (n^{os} 13, 14, 15, 16).

Pour les ouvrages dans lesquels le fendillement et les fissurations sont surtout à craindre en surface, il convient de réduire la richesse en ciment au minimum compatible avec les résistances que le béton doit présenter aux efforts mécaniques, à l'usure ou aux agents atmosphériques.

PREMIÈRE PARTIE

LE CIMENT PORTLAND ARTIFICIEL

1 —	Origine et dénomination	5
-----	-------------------------	---

CHAPITRE PREMIER

NOTIONS SUCCINCTES SUR LA FABRICATION ET LA COMPOSITION
DU CIMENT PORTLAND ARTIFICIEL. — PROGRÈS RÉALISÉS

2 —	1. Fabrication	6
3 —	2. Composition chimique	14
4 —	3. Progrès de l'industrie du ciment. — Superciment.	15

CHAPITRE II

PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DU CIMENT PORTLAND ARTIFICIEL.
REMARQUES PRATIQUES AUXQUELLES CES CARACTÉRISTIQUES
DONNENT LIEU AU POINT DE VUE DE L'EMPLOI DU CIMENT

5 —	1. Prise	17
6 —	Causes de variations dans la durée de prise des ciments :	
	a) Quantité d'eau de gâchage	18
	b) Action de la température et notamment de la gelée	19
	c) Influence de la nature de l'eau de gâchage	20
7 —	2. Durcissement et résistance	21
8 —	Résistances des ciments Portland artificiels fabriqués actuellement	
9 —	Causes de modification dans l'allure du durcissement et dans les résistances :	
	a) Proportion d'eau de gâchage	25
	b) Température. — Gelée.	28
	c) Influence des sels contenus dans l'eau de gâchage.	29
10 —	3. Stabilité ou non expansion du ciment	29
11 —	Remarques pratiques	30
12 —	Travaux à la mer	30
13 —	4. Variations de volume. — Dilatation. — Contraction. — Gonflement. — Retrait	32
14 —	Gonflement et retrait de durcissement	32
15 —	Variations de volume dues aux alternatives de sécheresse et d'humidité	35
16 —	Variations de température	36
17 —	Remarque	36
18 —	5. Finesse de mouture.	36
19 —	6. Matières d'addition au ciment	38
	Ciment Portland de fer	39
	Ciment Portland de laitier ou ciment de haut-fourneau	39
	Ciment de laitier	39

CHAPITRE III

GARANTIE DE QUALITÉ DES CIMENTS ARTIFICIELS PROVENANT DES
USINES AFFILIÉES AU GROUPEMENT PROFESSIONNEL
DES FABRICANTS DE CIMENT PORTLAND ARTIFICIEL DE BELGIQUE

20 —	Contrôle.	40
------	-----------	----

DEUXIÈME PARTIE

RÈGLES D'EMPLOI DU CIMENT DANS LES MORTIERS ET LES BÉTONS

CHAPITRE I

CHOIX, PRÉPARATION, CONSERVATION DES MATÉRIAUX ENTRANT
DANS LA CONSTITUTION DES MORTIERS ET BÉTONS

21 —	1. <i>Conservation du ciment</i>	47
22 —	2. <i>Sables</i>	49
23 —	Nature des sables	51
24 —	Composition granulométrique des sables	55
25 —	Caractéristiques de quelques sables	56
26 —	Qualités d'un sable	57
27 —	Conservation des sables sur les chantiers	57
28 —	3. <i>Pierrailles</i>	57
29 —	Nature et forme de la pierraille	59
30 —	Composition granulométrique de la pierraille	62
31 —	Qualités d'une bonne pierraille	63
32 —	Conservation de la pierraille	63
33 —	4. <i>Eau de gâchage</i>	63
34 —	Qualité	63

CHAPITRE II

DOSAGE DES MORTIERS ET BÉTONS

35 —	1. <i>Principes du dosage</i>	65
36 —	2. <i>Richesse en ciment</i>	65
37 —	3. <i>Composition granulométrique des mortiers et des bétons</i>	66
38 —	4. <i>Quantité d'eau de gâchage</i>	66
39 —	5. <i>Conclusion</i>	67
40 —	6. <i>Exécution des dosages sur les chantiers</i>	67
41 —	Dosage du ciment	68
42 —	Dosage des sables	68
43 —	Dosage de la pierraille	70
44 —	Dosage de l'eau	71
45 —	7. <i>Choix du dosage des mortiers et des bétons</i>	71
46 —	Richesse en ciment	71
47 —	Quantité d'eau	71

Composition granulométrique des mortiers et des bétons :

43 —	Mortiers. — Grosseur maximum du sable.	73
44 —	Bétons. — Grosseur maximum de la pierreaille	74
45 —	Règles fixant la composition granulométrique des mortiers et des bétons.	74

CHAPITRE III

DÉTERMINATION DE LA COMPOSITION GRANULOMÉTRIQUE

AINSI QUE DU DOSAGE EN CIMENT

ET EN EAU DES MORTIERS ET DES BÉTONS

46 —	§ 1. Diagrammes et tableaux donnant des compositions granulométriques types de bétons A, B et C	76
47 —	§ 2. Règles d'emploi des tableaux de compositions granulométriques des bétons	
	Choix de la composition granulométrique :	
	1) Caractéristiques des compositions A, B et C	77
	2) Poids spécifiques des squelettes	78
	3) Composition suivant la grosseur maximum du squelette.	78
	4) Détermination de grosseurs non indiquées aux tableaux.	79
	5) Éléments fins	79
48 —	Réalisation pratique des compositions A, B et C.	79
49 —	Grosseurs minimum et maximum d'un sable ou d'une pierreaille.	83
50 —	Concassage de la pierreaille	83
51 —	Granulométrie déterminée à l'aide de tamis à trous circulaires ou de tamis à mailles carrées.	84
52 —	§ 3. Formule donnant, pour les compositions A, B et C, les pourcentages de ciment en poids à admettre pour réaliser une richesse déterminée de ciment par m ³ de béton exécuté.	84
53 —	§ 4. Quantité d'eau à employer pour la fabrication des bétons de compositions A, B et C	85
54 —	§ 5. Résistances des bétons A, B et C	86
55 —	§ 6. Quelques exemples d'application des règles concernant la réalisation pratique des compositions A, B et C.	90
56 —	Tableau I. — Compositions des mortiers	98
57 —	Tableaux II, III, IV et V. — Compositions des bétons	99-104

CHAPITRE IV

FABRICATION ET MISE EN ŒUVRE DES MORTIERS ET DES BÉTONS

58 —	§ 1. Fabrication des mortiers et des bétons	105
59 —	Fabrication à bras	105
60 —	Fabrication mécanique	107
61 —	§ 2. Mise en place du béton	108
62 —	Mortiers et bétons de consistance humide.	109
63 —	Mortiers et bétons de consistance plastique	110
64 —	Mortiers et bétons de consistance fluide (ou coulés).	110
65 —	§ 3. Mortiers et bétons à la mer	111
66 —	§ 4. Mortiers et bétons à la gelée	113
67 —	§ 5. Conditions de durcissement. — Retrait. — Fissuration	114



**LE GROUPEMENT PROFESSIONNEL
DES FABRICANTS DE CIMENT PORTLAND
ARTIFICIEL** exerce un contrôle sur les ciments
fabriqués par les usines affiliées

Il dispose à cet effet :

- d'un laboratoire pourvu de toutes installations,
machines, etc., les plus modernes ;
- d'un personnel technique tout spécialement
compétent



La marque
ci-contre garantit
que le ciment est
soumis au contrôle

A la demande des acheteurs ou des consommateurs, le **LABORATOIRE DU GROUPEMENT PROFESSIONNEL** prélève des échantillons sur le ciment qui leur est fourni.

Il effectue également, sur ces échantillons ou sur d'autres échantillons qui lui seraient adressés, tous essais partiels ou complets désirés, soit suivant les normes officielles belges, soit suivant les spécifications d'autres pays.

Toute personne intéressée à l'exécution d'ouvrages au mortier ou au béton de ciment et utilisant le ciment d'une usine affiliée au **Groupeement professionnel** :

Qui désire obtenir des renseignements autres que ceux contenus dans la présente brochure,

Ou qui éprouve des difficultés dans l'exécution des travaux,

Peut s'adresser au **Groupeement**, qui lui fournira, à titre gracieux, toutes indications utiles.