

2^e Edition 1930.

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

Labels
3 1/2 L 12 - 2 1/2 L 5

Repro het MOT, Grimbergen

Repro het MOT, Grimbergen

Repro het MOT, Grimbergen

Repro het MOT, Grimbergen

Repro het MOT, Grimbergen

Repro het MOT, Grimbergen

Repro het MOT, Grimbergen

Repro het MOT, Grimbergen

Repro het MOT, Grimbergen

Repro het MOT, Grimbergen

Repro het MOT, Grimbergen

Repro het MOT, Grimbergen

Repro het MOT, Grimbergen

Repro het MOT, Grimbergen

Repro het MOT, Grimbergen

Repro het MOT, Grimbergen

Repro het MOT, Grimbergen

BROCHURES DE VULGARISATION

ÉDITÉES A CE JOUR PAR LE

GROUPEMENT PROFESSIONNEL DES FABRICANTS DE CIMENT PORTLAND ARTIFICIEL DE BELGIQUE

Nos 1 et 2. — LE GROUPEMENT PROFESSIONNEL DES FABRICANTS DE CIMENT PORTLAND ARTIFICIEL DE BELGIQUE.

Ces brochures, la première en français, la seconde en flamand, définissent l'objet du "Groupement".

N° 3. — SPÉCIFICATIONS GÉNÉRALES POUR LES CEMENTS PORTLAND ARTIFICIELS. (Edition française et Edition flamande).

Cette brochure donne également le mode d'exécution des essais de réception des ciments.

N° 4. — COMMENT FAIRE UN BON BÉTON.

Dans toutes ses applications à la maison, à l'atelier, à la ferme, etc (Edition française ou Edition flamande).

N° 5. — LE CIMENT PORTLAND ARTIFICIEL.

Fabrication, Propriétés, Mortiers et Bétons. (2^e Edition française - 1930).

Cet ouvrage, qui comprend 146 pages, comporte :

Dans sa première partie : Des indications sur la fabrication du ciment et sur ses propriétés principales : prise, durcissement, résistance, stabilité, retrait, etc.

Dans sa deuxième partie : Des renseignements sur les règles d'emploi du ciment dans les mortiers et les bétons.

Elle réunit une documentation importante sur les caractéristiques des sables, poussières, graviers et pierrailles les plus couramment employés dans notre pays.

Elle recommande des règles pour déterminer les meilleures proportions mélanges sables-pierrailles.

Elle donne des formules permettant de fixer :

1^o La proportion de ciment nécessaire pour réaliser un béton contenant m³ un nombre déterminé de kg. de ciment.

2^o La quantité d'eau de gâchage.

3^o La résistance probable des mortiers et bétons en fonction des données du dosage et de la quantité de ciment.

N° 6. — ALLÉES DE JARDINS, CHEMINS D'ACCÈS, TROTTOIRS. (Edition française ou Edition flamande).

Donne la manière d'exécuter ces divers travaux et les dosages des bétons à employer.

N° 7. — BLOCS ET MURS EN BÉTONS. PIERRE ARTIFICIELLE ET DÉCORATION ÉLÉMENTAIRE. (Edition française ou Edition flamande).

N° 8. — PIEUX, POTEAUX, PILASTRES, CLOTURES EN BÉTON. (Edition française ou Edition flamande).

N° 9. — MANUEL DU BÉTON ARMÉ. (Edition française).

Cet ouvrage, qui constitue le guide du surveillant de chantier, du bétonneur professionnel et de l'amateur, comporte :

Dans sa première partie : Des explications simples, mais complètes, sur le rôle et la disposition des armatures dans le béton armé, suivant toutes les sollicitations auxquelles ce matériau peut être soumis.

Dans sa deuxième partie : Des indications sur l'exécution du béton armé : préparation et mise en place des armatures, confection des coffrages, etc.

Dans sa troisième partie : Des tableaux donnant les éléments nécessaires pour résoudre quelques cas simples de poutres, dalles, hourdis et poteaux en béton armé.

N° 10. — POULAILLERS ET CLAPIERS MODERNES EN BÉTON. (Edition française ou Edition flamande).

N° 11. — MANUEL POUR L'EXÉCUTION DE LA ROUTE ET DE LA RUE EN BÉTON. (Edition française ou Edition flamande).

Cet ouvrage constitue un guide pratique et donne des renseignements complets sur tous les travaux que comporte l'exécution de la route et de la rue en béton. Les prescriptions qu'il contient s'adressent également à tous ceux qui s'intéressent à l'exécution du revêtement en béton, dans le sens le plus général de ce mot.

N° 12. — LES ENDUITS DE CIMENT. (Edition française ou Edition flamande).

Caractérise les principes d'exécution des enduits et leurs textures diverses.

Ces brochures sont envoyées gratuitement, sauf les brochures n° 5, n° 9, n° 11 et n° 12, dont le coût respectif de chacune est fixé, frais d'envoi compris, à 12, 10, 10 et 6 frs. à verser au compte chèques-postaux N° 159.479 du groupement.

Les demandes doivent être adressées au :

GROUPEMENT PROFESSIONNEL DES FABRICANTS DE
CIMENT PORTLAND ARTIFICIEL DE BELGIQUE (G. P. C.)

45, Boulevard du Régent,
BRUXELLES.

— LE CIMENT — PORTLAND ARTIFICIEL

FABRICATION - PROPRIÉTÉS

MORTIERS ET BÉTONS

*2^e édition. - 1930. - Remaniée et mise à jour en
tenant compte des progrès réalisés dans la connais-
sance et la mise en œuvre des mortiers et bétons.*

Publié par le :

GROUPEMENT PROFESSIONNEL DES
FABRICANTS DE CIMENT PORTLAND
ARTIFICIEL DE BELGIQUE (G. P. C.).

(Association sans but lucratif)

45, Boulevard du Régent, BRUXELLES.

LE GROUPEMENT PROFESSIONNEL DES FABRICANTS DE CIMENT PORTLAND ARTIFICIEL (G. P. C.) exerce un *contrôle* sur les ciments fabriqués par les usines affiliées.

Il dispose à cet effet :

Du *laboratoire* d'essai des matériaux de l'Université libre de Bruxelles. Ce laboratoire est pourvu de toutes installations, machines, etc., les plus modernes ;

D'un *personnel* technique tout spécialement compétent.

Toute personne intéressée à l'exécution d'ouvrages au mortier ou au béton de ciment,

— 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 Professionnel des Fabricants de Ciment Portland Artificiel de Belgique*", qui lui fournira, à titre gracieux, toutes indications utiles.

A la demande des acheteurs ou des consommateurs, le "*Groupeement Professionnel*" fait prélever, par son laboratoire, des échantillons du ciment qui leur est fourni.

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

Le laboratoire d'essai des matériaux du "*Groupeement Professionnel*" exécute également tous essais et études sur les qualités et propriétés des matériaux mis en œuvre dans les constructions : mortiers, bétons, briques, pierres, agglomérés de toute nature, etc.

Adressez échantillons, exactement :

**Service de Recherches du Groupeement
Professionnel du Ciment (G. P. C.)**

**UNIVERSITÉ LIBRE
BRUXELLES (Solbosch).**

Lire la note au dos de la couverture.

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.

Que de fois n'entend-on pas incriminer *a priori* la qualité du ciment quand un béton donne de mauvais résultats. On ignore ou on oublie que la qualité du béton dépend de beaucoup d'autres facteurs si importants que, si l'on néglige de tenir compte des principaux d'entre eux, on peut arriver à faire un très mauvais béton avec un très bon ciment.

Préciser les règles de préparation et de mise en œuvre des mortiers et des bétons paraît donc utile.

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 également 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 pratiques de leur mise en œuvre sur chantier.

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 et du béton dans les constructions modernes.

* * *

L'épuisement rapide de la première édition de cette brochure montre tout l'intérêt qu'elle a suscité chez tous ceux qui, directement ou indirectement, s'occupent de la mise en œuvre du ciment.

De nombreux établissements d'instruction ont eu également recours à cette brochure pour leur enseignement, mettant ainsi en main de leurs élèves des notions simples, mais complètes sur les propriétés des ciments, mortiers et bétons. C'est à ce succès qu'est due la publication de la deuxième édition. L'ouvrage a été remanié et notablement augmenté en tenant compte des résultats des recherches et études poursuivies au cours de ces deux dernières années par le laboratoire du Groupement Professionnel des Fabricants de Ciments Portland Artificiel.

PREMIÈRE PARTIE

Le Ciment Portland Artificiel.

ORIGINE ET DÉNOMINATION

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 calcaire-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*.

CHAPITRE I

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

Progrès réalisés.

I. — 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 parfaitement homogénéisés dans toutes leurs parties, sont soumis à la cuisson jusqu'à commencement de ramollissement. La mouture de la roche scorifiée ou « Clinker » ainsi obtenue donne une poudre fine qui constitue le ciment Portland artificiel.



Fig. 1. — Carrière d'argile.

En Belgique, en général, les matières utilisées sont la *craie* et l'*argile* (fig. 1 et 2), 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 calcaireuses, 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 (fig. 4). Celle-ci est *finement moulue* (fig. 5), ce qui amène un mélange très intime des matières premières et favorise les réactions de cuisson.

Cependant les usines du Tournaisis emploient le procédé par « voie sèche ». Elles utilisent comme matières premières une pierre de l'endroit (fig. 3) dont la composition chimique se rapproche de celle des mélanges artificiels. Certaines usines concassent la pierre et la réduisent en une poudre fine qui est



Fig. 2. — Carrière de craie.

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



Fig. 3. — Carrière de calcaire argilo-siliceux.

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



Fig. 4. — Malaxeur des matières premières (voie humide).

de longueur sur 2 à 3 mètres de diamètre; ils sont légèrement inclinés sur l'horizontale et animés d'un mouvement de rotation lent autour de leur axe (fig. 8 et 9).

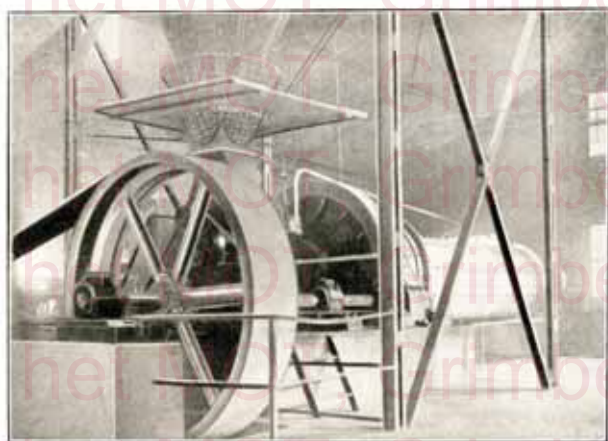


Fig. 5. — Moulin pour la mouture de la pâte.

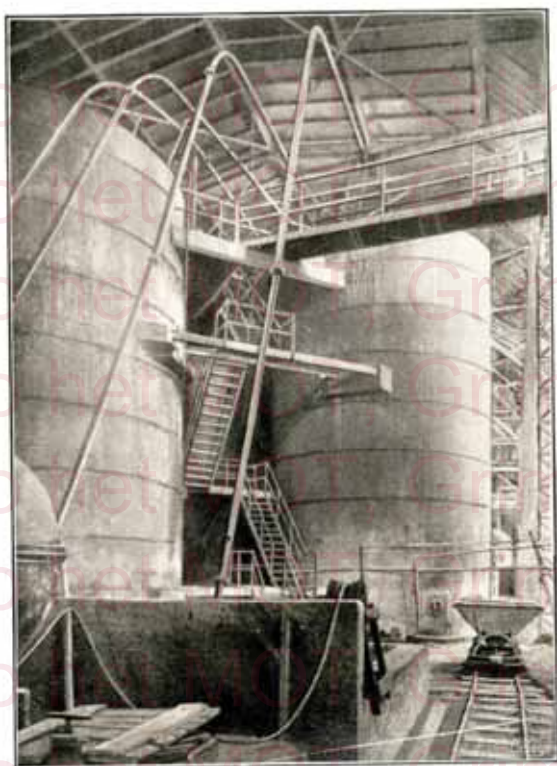


Fig. 6. — Cuves à pâte. — Bassins homogénéisateurs.

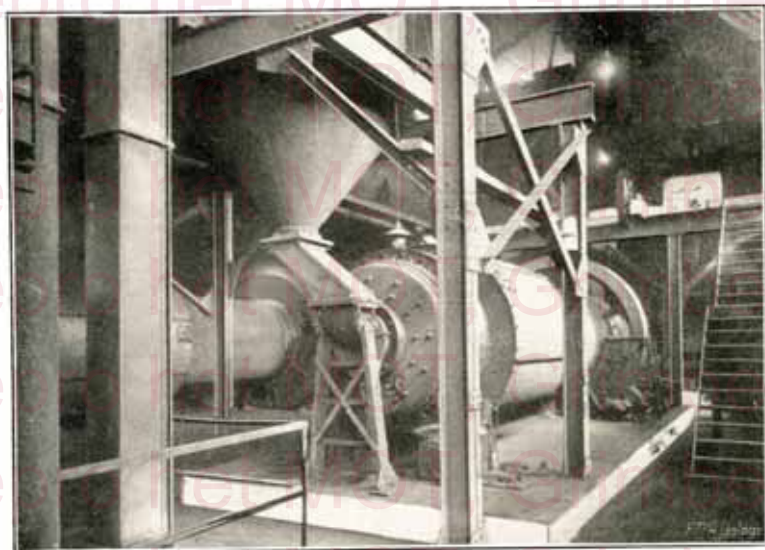


Fig. 7. — Broyeur à charbon.

Le chauffage de ces fours s'effectue au moyen de charbon pulvérisé (fig. 7); 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 (fig. 6), une série de contrôles et de corrections de dosage,

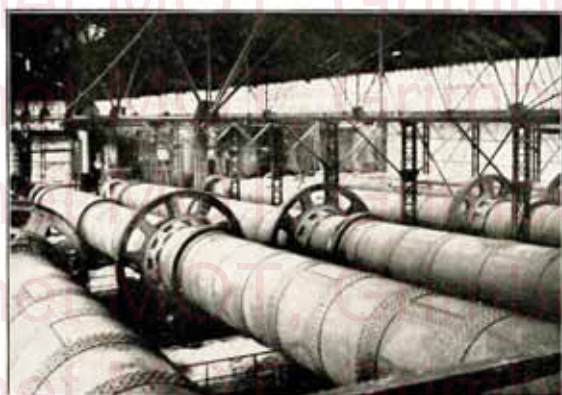


Fig. 8. — Fours rotatifs.

la pâte diluée 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°, la cuisson finale jusqu'à amollissement et commencement de vitrification.



Fig. 9. — Fours rotatifs.

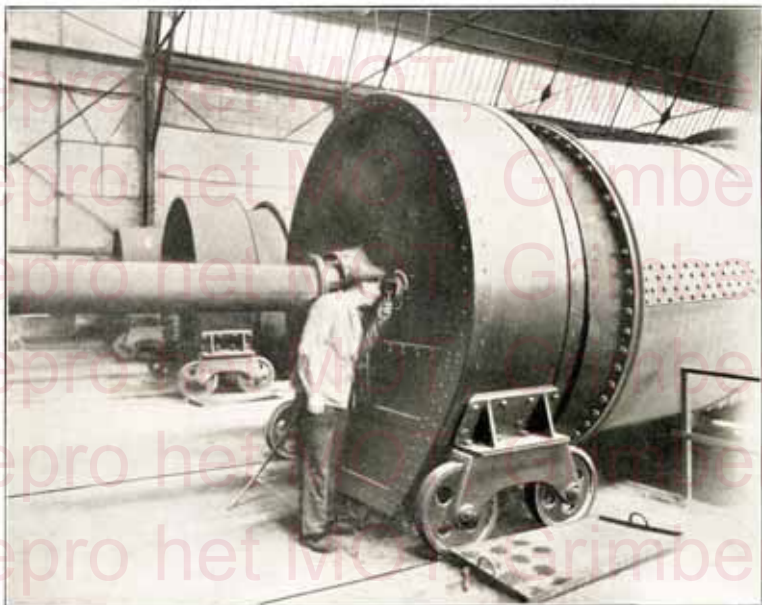


Fig. 10. — Contrôle de la bonne marche du four.

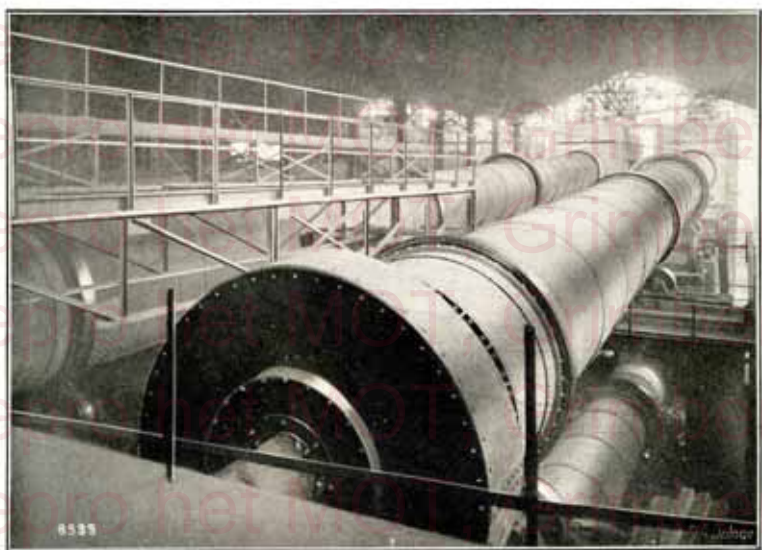


Fig. 11. — Fours rotatifs. — Tube refroidisseur du clinker (voir sous le four de droite).

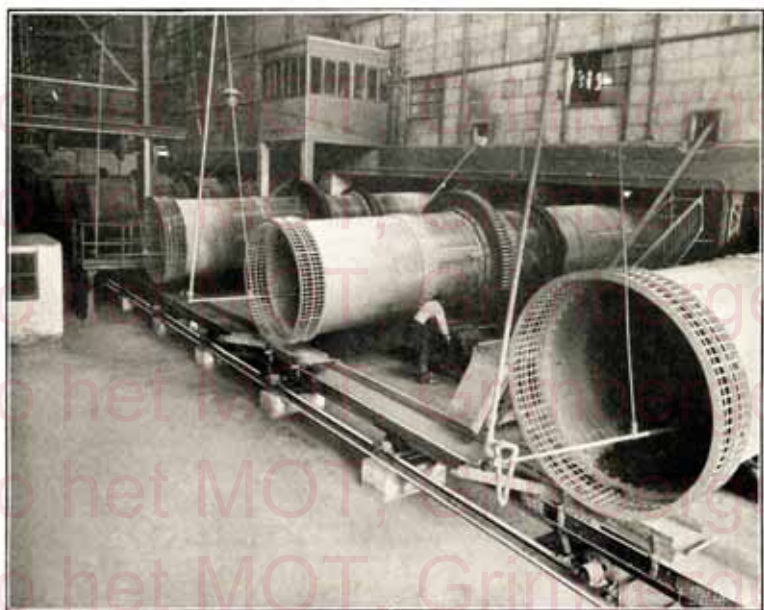


Fig. 12. — Tubes refroidisseurs du clinker (sortie du clinker).



Fig. 13. — Silos à ciment.

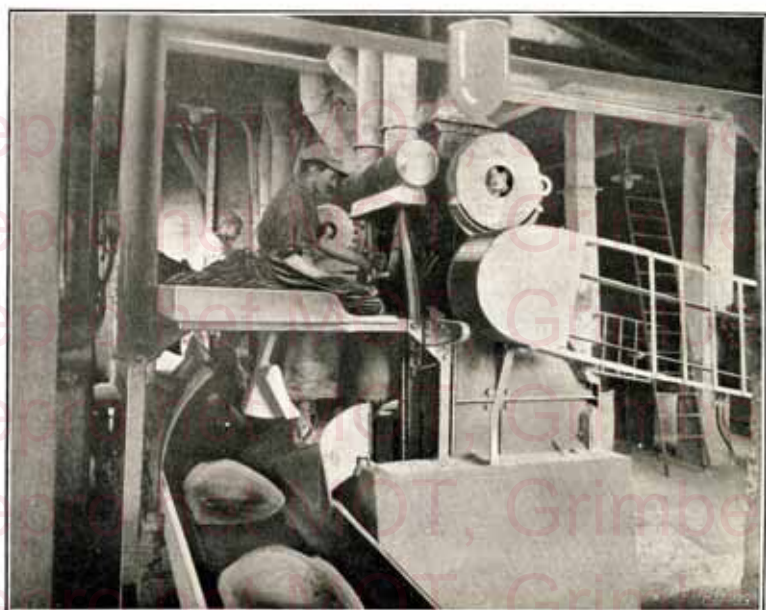


Fig. 14. — Ensachage automatique Bates.

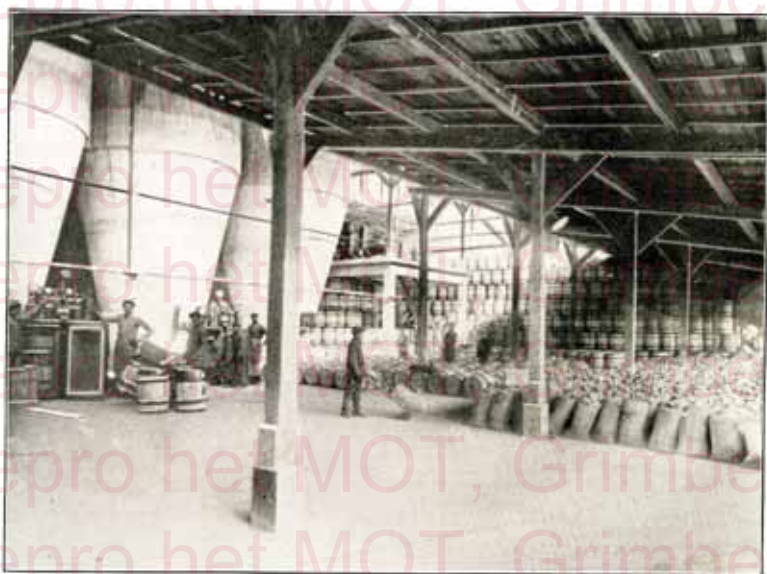


Fig. 15. — Embarillage.

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 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 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 (fig. 11 et 12). 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 (fig. 13), d'où il est repris, à mesure des besoins, pour l'ensachage ou l'embarillage (fig. 14 et 15).

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.

II. — 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 Portland artificiel 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.

III. — PROGRÈS 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.

En Belgique, ils sont actuellement rangés 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.

CHAPITRE II

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.

Il 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 et qu'ils contiennent plus d'eau.

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

(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.

cement 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 gâchage ⁽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 d'eau de gâchage;

2° De la température et spécialement de la gelée;

3° Des sels contenus dans l'eau de gâchage ou additionnés au ciment.

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. (Diagramme I.)

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, par suite d'une dessiccation trop intense, occasionner 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 mettre en œuvre,

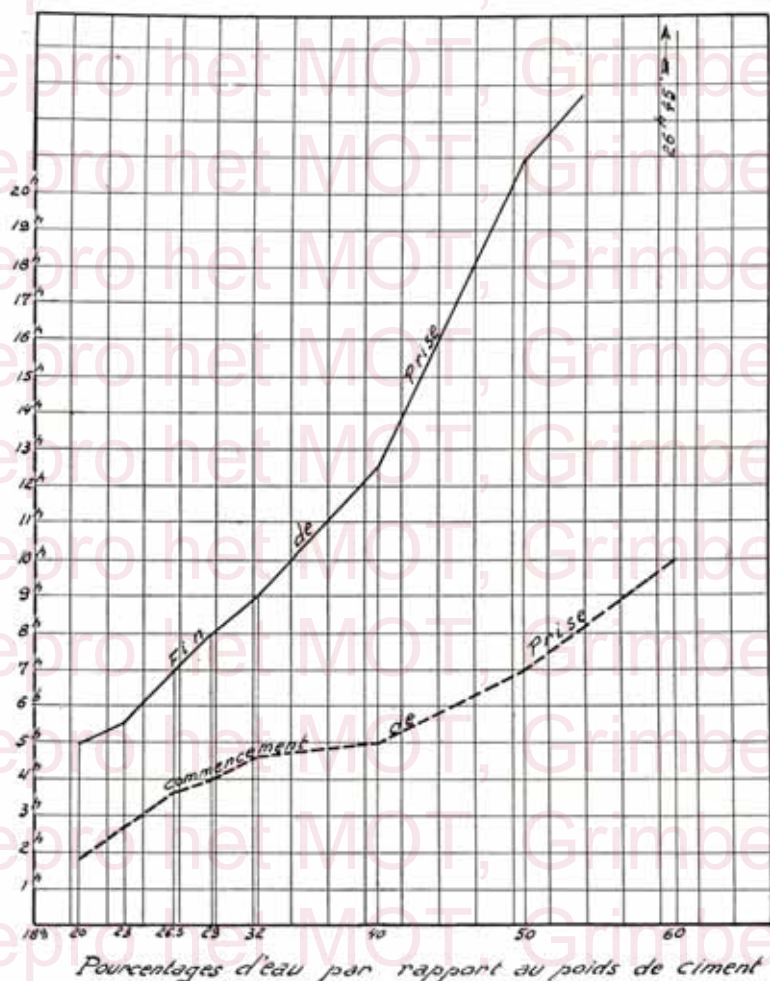


DIAGRAMME I.

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

sans danger, mortiers et bétons jusqu'à des températures de -1° à -2° C. Il est cependant difficile de donner une règle fixe à ce sujet, et il convient d'être prudent, car la prise est fonction de la température du mortier ou du béton; et celle-ci résulte autant de la température des matériaux et de l'eau au moment

du malaxage que de la température ambiante. Si l'on accroît la température de l'un de ces facteurs, de l'eau, par exemple, il sera possible de travailler par un froid plus vif. Il est à retenir que lorsque le mortier ou le béton descend à une température inférieure à $+5^{\circ}$, la prise est déjà notablement ralentie.

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, pierres 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° 73).

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

c) *Influence des sels contenus dans l'eau de gâchage ou additionnée au ciment.*

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° 33).

II. — DURCISSEMENT ET RÉSISTANCES

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

Les silicates de chaux, agents principaux de ce durcissement, continuent

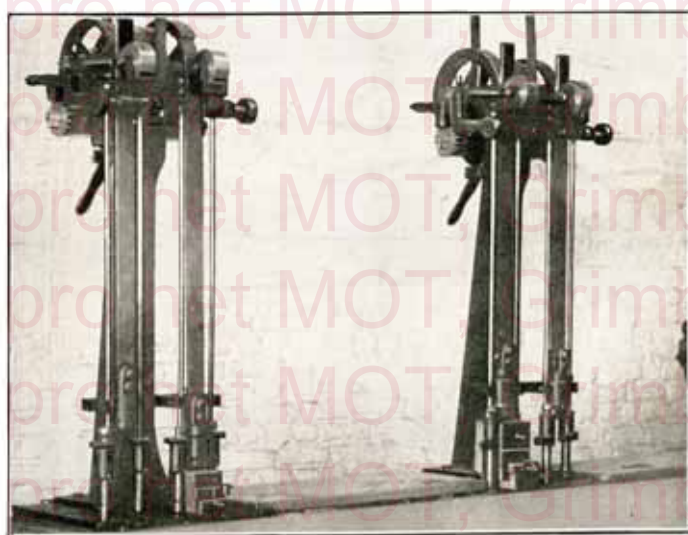


Fig. 16. — Pilonneuses des mortiers normaux pour l'essai de traction et de compression.

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 dureté 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



Fig. 17. — Balance de Michaëlis pour la détermination de la résistance des mortiers à la traction.

tout aux ciments, c'est de communiquer aux ouvrages 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 (fig. 17 et 18).



Fig. 18. — 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) (fig. 16), le mode et la durée de conservation, en un

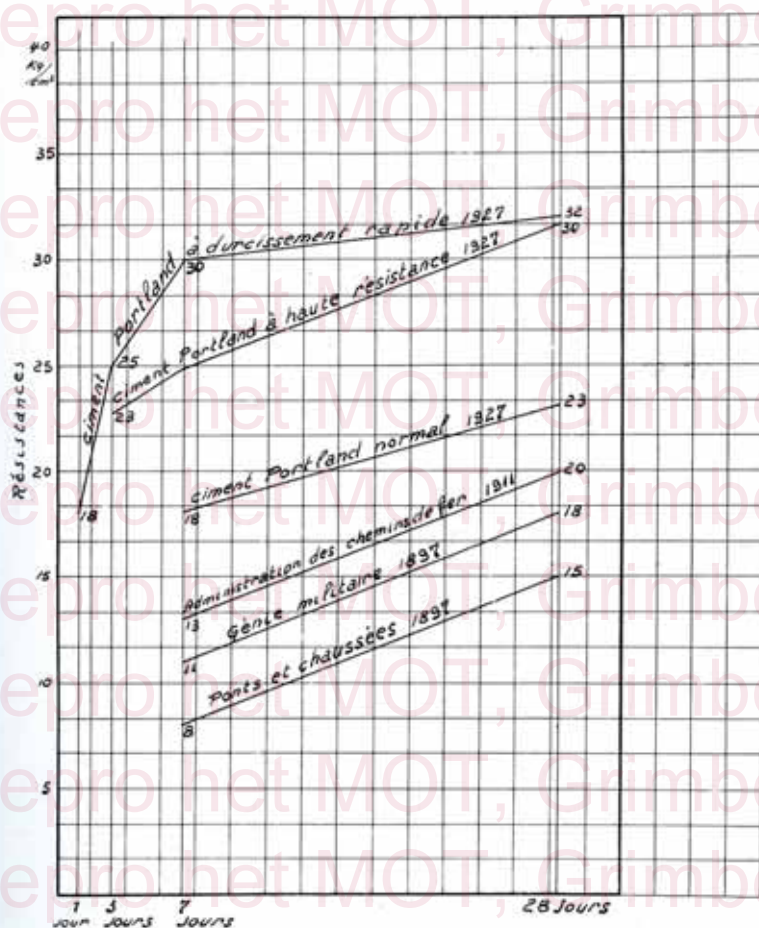


DIAGRAMME II

Graphique de l'évolution des normes fixant les résistances minima des mortiers normaux battus à la traction.⁽¹⁾

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.

(1) Ce diagramme comporte une erreur : la résistance à la traction à 1 jour des P. A. D. R. est de 20 kg/cm² et non de 18 kg/cm².

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 trente dernières années environ, qu'en établissant le graphique des exigences successives des administrations publiques en ce qui concerne les résistances des mortiers normaux de ciment. Dans ces diagrammes II et III, on peut comparer ces exigences

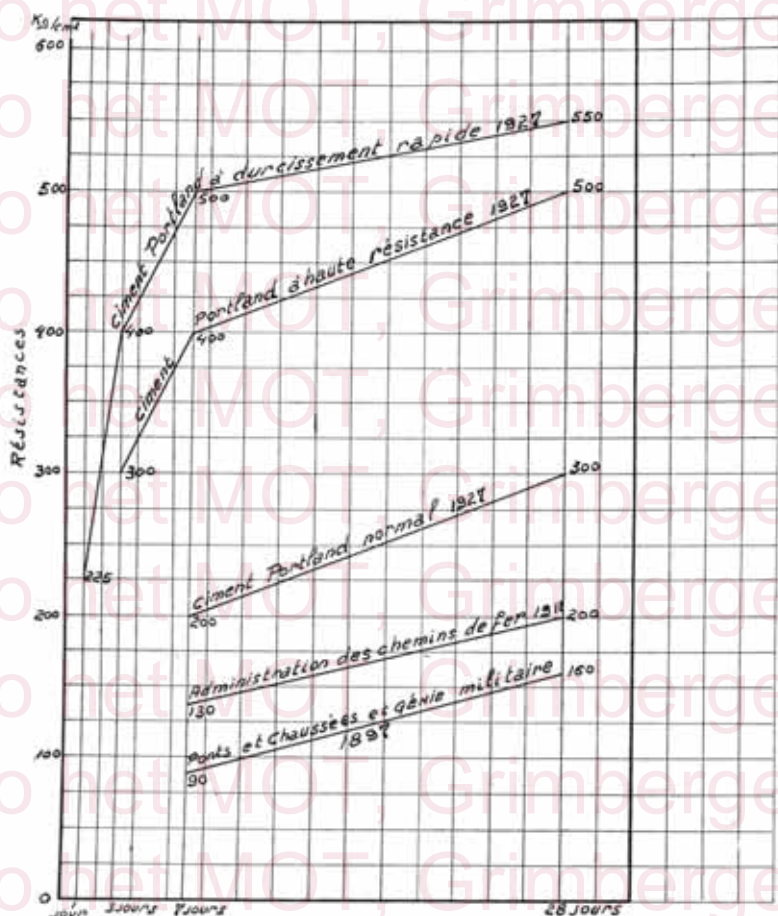


DIAGRAMME III.

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

entre elles et constater le relèvement formidable des conditions imposées officiellement en 1927 par toutes les administrations. C'est à ces conditions que se soumettent volontairement, à l'heure actuelle, les membres du Groupement Professionnel des Fabricants de Ciment Portland artificiel de Belgique pour

toute fourniture de ciment, même lorsqu'elle n'est pas régie par les cahiers des charges d'une administration.

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 ces 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 marge 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 d'eau de gâchage, degré de sécheresse ou d'humidité, température du milieu où le durcissement s'effectue, nature des sels contenus dans l'eau de gâchage ou additionnés au ciment.

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 42, 55, 69, 70, 71).

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.

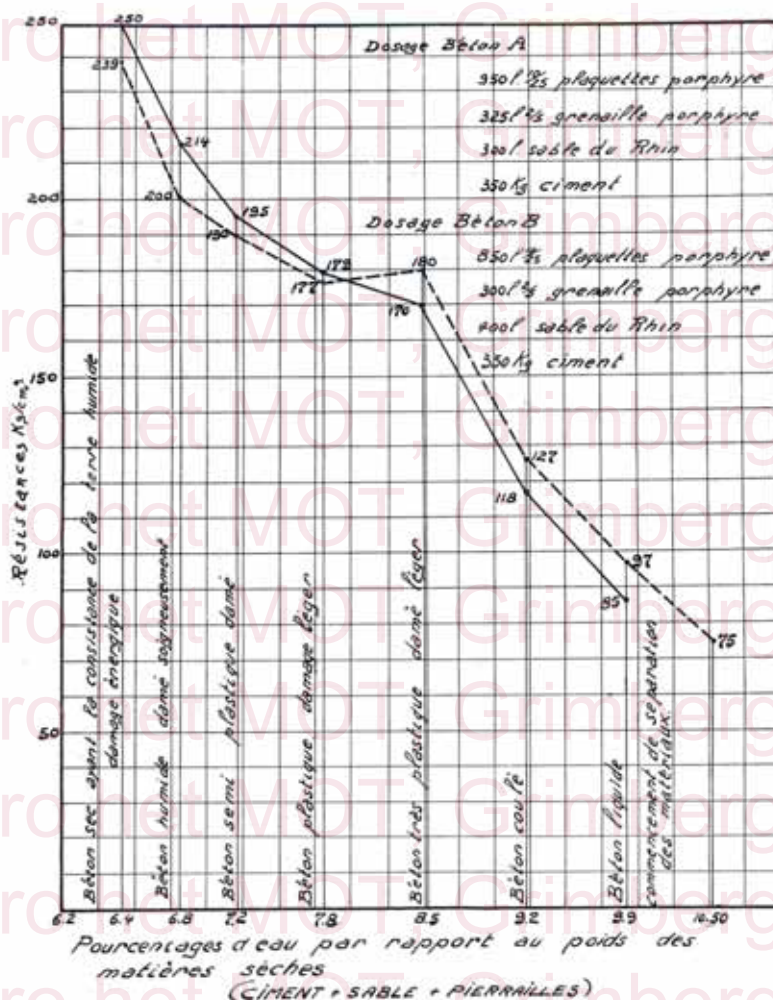


DIAGRAMME IV.

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

L'insuffisance d'eau rend très difficile la mise en place des mortiers et des 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 un

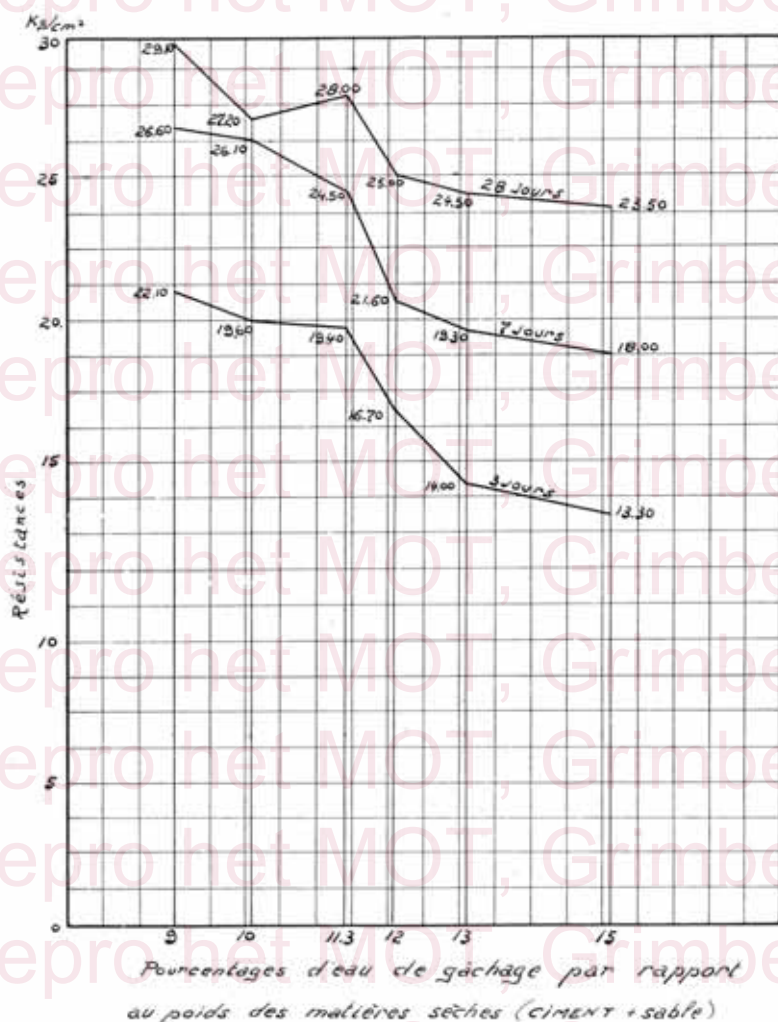


DIAGRAMME V.

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.

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, lui enlevant ainsi, sur l'étendue de leurs surfaces de contact, l'adhérence et la résistance indispensables à la cohésion de l'ouvrage.

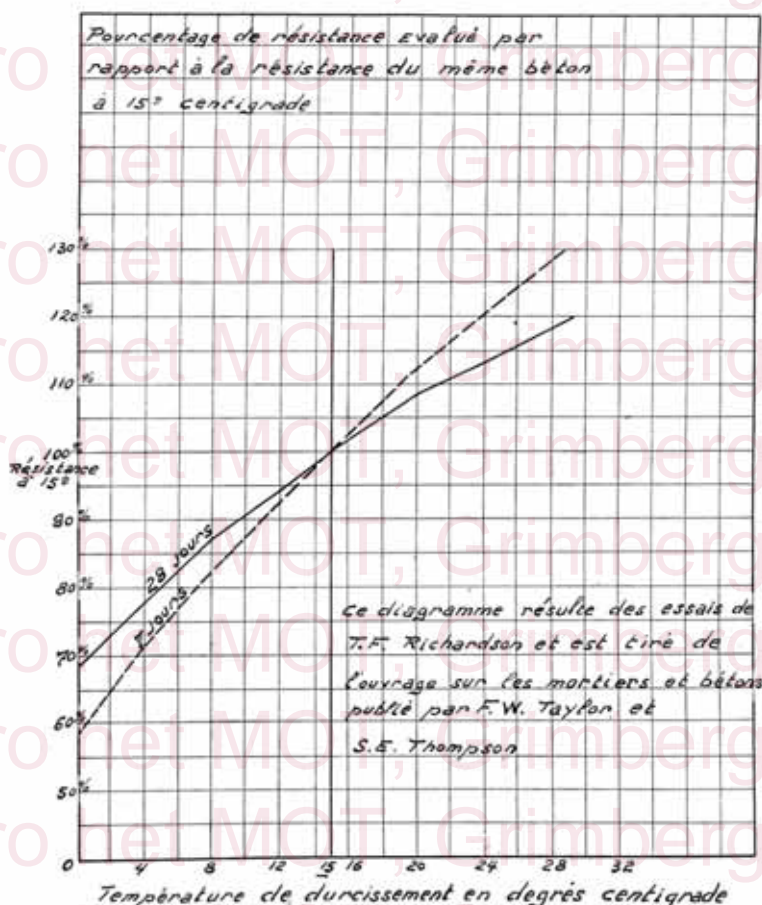


DIAGRAMME VI.

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, ainsi que le montre le diagramme VI. C'est principalement au début du durcissement que cette action est importante, c'est donc surtout au cours même de l'exécution du bétonnage et jusqu'au moment du décoffrage, que

l'attention doit se porter sur la température. Les paragraphes n^{os} 72 et 73 donnent des renseignements pratiques plus complets à ce sujet.

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 ou l'emploi d'un ciment durcissant plus vite;
- La réduction de la proportion d'eau de gâchage; l'addition de certains sels (n^o 73);
- 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 ou additionnés au ciment.*

Les résistances sont diminuées :

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

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 n^{os} 33 et 73.

III. — STABILITÉ 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 boursoufflement 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 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° 33).

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.

Au cours de l'hydratation et de la cristallisation des silicates et des aluminates de chaux, c'est-à-dire pendant la prise et le durcissement des ciments, il se produit des réactions mettant en liberté de la chaux éteinte Ca (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 possibles de l'eau de mer et se résument comme suit:

1° Faire usage de mortiers ou de bétons riches, compacts, imperméables.

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

2° 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 déshydratée et pulvérisée, certains laitiers de hauts fourneaux. 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.

3° Créer en surface une couche 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 une surface imperméable et très peu soluble.

4° 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° 76).

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.

Ces variations de volume sont causées par le durcissement du ciment et, ultérieurement, par des variations de température et d'humidité.

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. Ce gonflement est beaucoup moins important que la contraction.

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 l'un des deux états physiques suivants :

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 réactions 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. D'autres auteurs attribuent le retrait et le gonflement aux variations des tensions capillaires dans les pores

du matériau, par suite de pénétration ou d'évacuation de l'eau. Les deux causes entrent vraisemblablement en jeu.

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'inté-

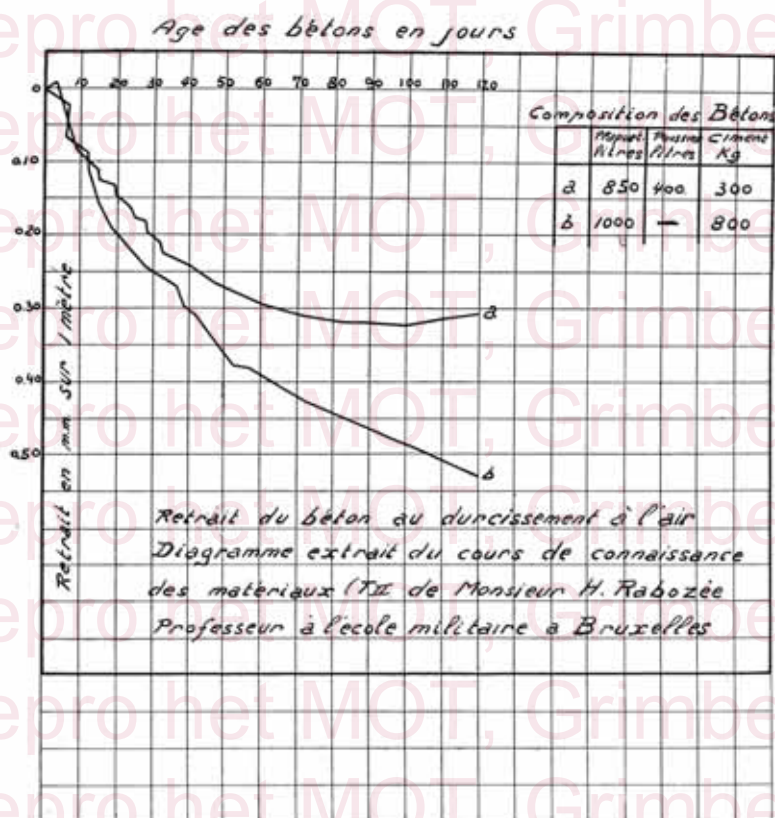


DIAGRAMME VII.

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

rieur de la masse. Il se produit donc un retrait en surface, tandis que le cœur des pièces ne varie pas de volume, 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 revêtements de route en frottement

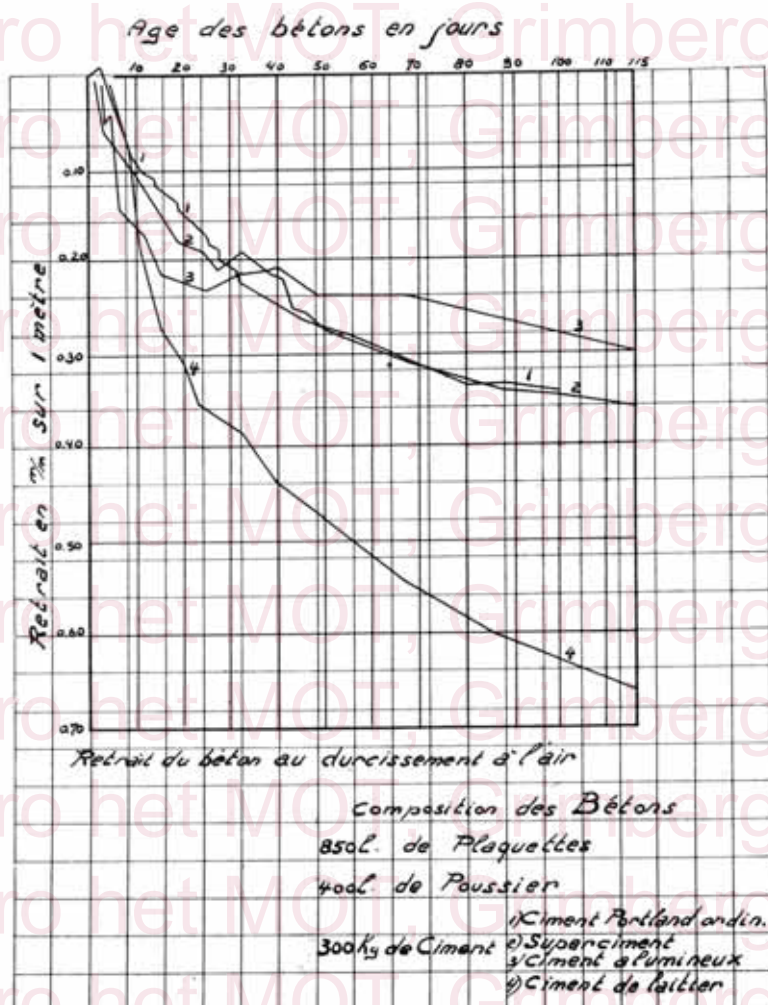


DIAGRAMME VIII.

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.

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.

Des nombreuses expériences faites en vue de déterminer l'influence de

la composition des mortiers et bétons sur la grandeur du retrait, il résulte ce qui suit :

1° Le retrait à l'air, important au cours des 3 à 4 premiers mois, se manifeste moins dans la suite; et d'une façon insignifiante après 1 an. A l'air sec, le coefficient de contraction peut varier de 0,0003 à 0,0004 pour des bétons de dosage courant. Pratiquement, le retrait atteint rarement cette importance à cause des intempéries auxquelles les ouvrages sont exposés (n° 15) et à cause du fait que, dans les ouvrages, les sections des pièces sont généralement plus fortes que celles des éprouvettes qui servent à faire la mesure du retrait au laboratoire et que, partant, la dessiccation interne ne se produit pas complètement;

2° Il n'y a aucune différence dans le retrait des mortiers et bétons de ciment Portland normal, de superciment ou de ciment alumineux; le ciment de laitier, par contre, provoque un retrait à peu près double de celui des ciments précédents (diagramme VIII);

3° Le retrait s'accroît avec la richesse en ciment (diagramme VII);

4° Le retrait s'accroît quand s'accroît la quantité d'eau de gâchage;

5° Le retrait s'accroît quand il y a addition de sels à l'eau de gâchage, carbonate de soude et principalement chlorure de calcium.

Pour réduire l'importance du retrait et de ses effets, 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 ALTER- NATIVES 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 modifications de volume dont les effets, quoique moindres, se rapprochent 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

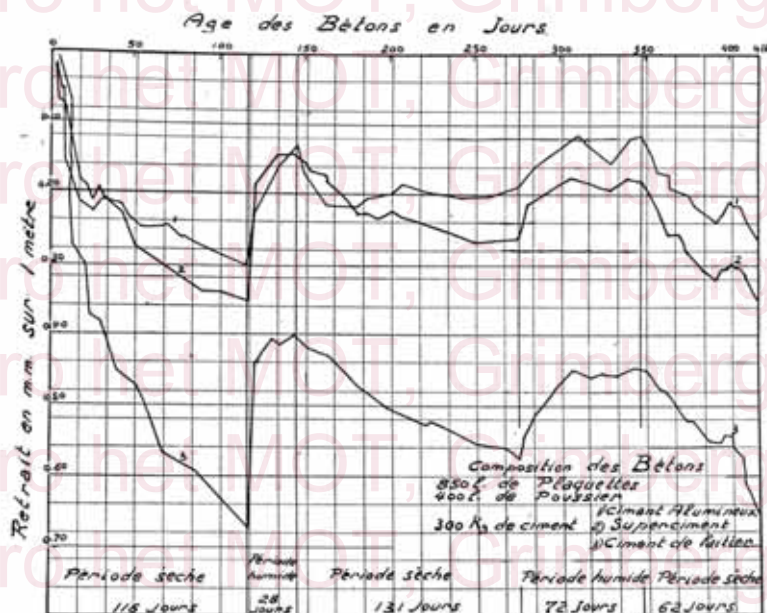


DIAGRAMME IX.

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

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

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 le phénomène.

CHANGEMENTS DE VOLUME DUS AUX 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 linéaire des bétons en fonction de la température est du même ordre de grandeur que celui de l'acier; il varie de 0,000010 à 0,0000125, alors que celui de l'acier est de 0,000012 environ.

Cette coïncidence est heureuse pour la bonne adhérence des armatures au cours des déformations thermiques 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° 75).

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 que les mortiers confectionnés au moyen de grains dépassant une certaine dimension 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 CEMENTS DE FINESSES DIFFÉRENTES (1)

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

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

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 mm.

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 mm.

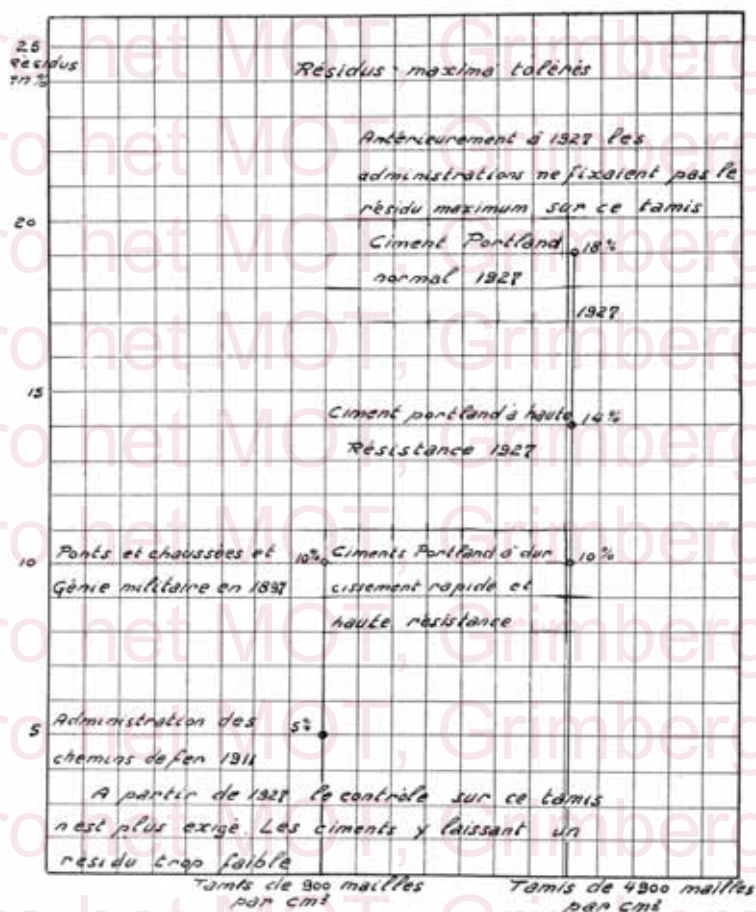


DIAGRAMME X.

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

Etant donnée la finesse actuelle de certains ciments, le tamis de 900 mailles n'est plus guère employé; il est même question d'utiliser des tamis

de 10,000 mailles par centimètre carré, retenant les grains de 0,065 à 0,070 mm.

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 X.

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 donnant 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 étant généralement du laitier granulé de haut fourneau.

CIMENT PORTLAND DE FER

Le ciment Portland de fer se compose d'au moins 70 parties en poids de clinker de ciment Portland et pour le reste de laitier basique granulé.

Le laitier et le clinker sont moulus finement ensemble, avec une addition éventuelle réglant la prise.

CIMENT PORTLAND DE LAITIER OU CIMENT DE HAUT FOURNEAU

Le ciment de haut fourneau se compose de 15 à 69 parties en poids de clinker de ciment Portland et pour le reste de laitier basique granulé.

Le laitier et le clinker sont moulus finement ensemble avec une addition éventuelle réglant la prise.

Le ciment Portland qui entre dans ces composés résulte lui-même très souvent d'un mélange de laitier basique et de chaux ou de calcaire, 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.

CHAPITRE III

Garantie de qualité des Ciments Portland artificiels sortant des usines affiliées au "Groupement Professionnel des Fabricants de Ciment Portland artificiel de Belgique".

CONTRÔLE DE LA QUALITÉ DU CIMENT

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, chacun d'eux a pris les engagements suivants:

« a) de fournir son ciment exclusivement sous l'une de ses marques » de fabrique déposées;

« b) de faire accompagner chaque fourniture 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) d'insérer, dans ses conditions générales de vente, une clause disant » qu'il se soumet au contrôle du Laboratoire officiel du Groupement Profes- » sionnel. Ce laboratoire pourra, soit de sa propre initiative, soit à la demande » du fabricant ou de l'acheteur, faire un contrôle du ciment. »

Les prélèvements d'échantillons ont lieu soit à l'usine, soit au port d'embarquement, s'il s'agit de ciment destiné à l'exportation.

Ils se font à l'usine, chez le négociant ou sur chantier, s'il s'agit de ciment destiné au pays.

Quant aux essais, ils sont effectués avec grand soin au laboratoire du Groupement, à l'Université de Bruxelles, par un personnel compétent et impartial et dans des conditions techniques parfaites.

On peut donc dire que le contrôle du Groupement Professionnel est de nature à inspirer une confiance absolue.

Pour attester qu'un ciment est soumis au contrôle, le Groupement Professionnel a fait déposer, en tous pays, la marque ci-contre, dont seuls ses affiliés peuvent faire usage.

La valeur de cette marque résulte des conditions auxquelles son utilisation est subordonnée, et qui font qu'elle ne couvre jamais que du ciment originaire des usines soumises au contrôle et que ce ciment est de qualité irréprochable.



Pour assurer la toute première qualité du ciment couvert par cette marque, les fabricants affiliés se sont engagés à ne fournir sous elle que du ciment répondant au minimum aux conditions suivantes :

A l'intérieur du pays : Le ciment livré dans le pays devra satisfaire aux normes belges reproduites ci-après. La marque ne signifie donc nullement que le ciment qui la porte satisfait uniquement aux conditions exigées d'un ciment Portland artificiel normal (P. A. N.), mais bien qu'il satisfait aux conditions exigées de la classe (P. A. N. ou P. A. H. R. ou P. A. D. R.) qu'il revendique commercialement.

A l'exportation : Le ciment exporté devra satisfaire non seulement aux conditions imposées au ciment dans notre pays suivant la catégorie à laquelle il appartient, mais, en outre, aux spécifications du pays de destination si celles-ci sont plus sévères que les spécifications belges.

Enfin, tout ciment destiné à un travail spécial à effectuer, soit en Belgique, soit à l'étranger, devra satisfaire aux conditions particulières régissant ce travail.

Le Groupement Professionnel, par son contrôle, veille donc à éviter tout mécompte à tous ceux qui achètent et utilisent le ciment de ses affiliés.

21. — SPÉCIFICATIONS GÉNÉRALES OFFICIELLES

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 teneurs 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 au cours du durcissement à froid ne pourra dépasser 6 mm.; l'augmentation de l'écartement des aiguilles au cours de l'essai à chaud ne pourra dépasser 6 mm.; l'augmentation totale de l'écartement des aiguilles ne pourra dépasser 10 mm.

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 j. 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 dur- cissement rapide	Traction	20	25	30	32
	Compression	225	400	500	550

DEUXIÈME PARTIE

Mortiers et Bétons

CHAPITRE I.

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

CONSERVATION DU CIMENT

22. — 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 suffisamment 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.

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



Fig. 19. — Carrières de porphyre de Quenast. Vue générale de l'une des carrières.

(Reproduction Interdite).

Cliché obligeamment prêté par "La Technique des Travaux".

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

Au cours du transport, les sacs de ciment seront couverts de toiles imperméables.

Sur les chantiers, où l'emmagasinement est parfois d'assez longue durée, ils 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 des conditions parfaites de conservation à l'abri de l'air, telles dans les silos des usines, 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 leur résistance.

Les ciments Portland de fer se conservent moins bien. Quant aux ciments de laitier, ils perdent jusqu'à 50 % de leur résistance après trois ans d'emmagasinement dans les mêmes conditions.

Toutefois, quelles que soient les précautions prises, la conservation des ciments sur chantier ne peut être parfaite. Aussi faut-il s'attendre à une réduction plus ou moins grande de résistance des ciments suivant les soins apportés à leur emmagasinement. Dans de bonnes conditions normales d'emmagasinement sur chantier, on peut enregistrer après 6 mois à 1 an des réductions de résistance de 10 à 20 %. Les ciments à durcissement rapide sont particulièrement sensibles, non qu'ils perdent plus que d'autres de leur résistance finale, mais parce qu'ils voient diminuer progressivement leur propriété de durcir très vite au cours des premiers jours qui suivent leur mise en œuvre.

L'utilisation d'une enveloppe intérieure dans les sacs est un élément de garantie pour la bonne conservation des ciments.

Ces quelques remarques mettent en évidence toute l'importance qu'il faut attacher à la conservation sur chantier des ciments et spécialement des super-ciments.

II. — SABLES

Pour la clarté des indications qui vont suivre, il est nécessaire de donner quelques définitions concernant la nature et la composition granulométrique

des sables (grosseurs et proportions des diverses grosseurs des grains qui les constituent).

NATURE DES SABLES

23. — 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.

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.

Les poussiers provenant du concassage des laitiers non granulés de haut fourneau rentrent dans cette catégorie.

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.



Fig. 20. — L'un des multiples sièges d'exploitation des carrières de porphyre de Lessines.

COMPOSITION GRANULOMÉTRIQUE DES SABLES

24. — 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 mm.

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 mm. de diamètre.

Nous appellerons :

	Passant au tamis de:	Retenu au tamis de:
Sable gros.	5 mm.	2 mm.
Sable moyen.	2 mm.	0,5 mm.
Sable fin	0,5 mm.	—

Nos sables de rivière et nos sables artificiels ou poussières contiennent généralement ces trois catégories de grosseurs de grains, ou du moins les grosseurs moyennes et fines. Les poussières notamment sont parfaitement calibrés et l'on trouve dans le commerce des poussières 0/5 mm., 0/3 mm. ou 0/2 mm.; on trouve de même du sable gros artificiel livré sous la dénomination de grenailles 2/5 mm. Certaines usines métallurgiques fournissent des poussières 0/8 mm. à 0/10 mm. de laitier de haut fourneau. Presque tous nos sables de carrières sont fins. Les meilleurs ne contiennent que peu d'éléments moyens. Beaucoup sont même très fins c'est-à-dire que la dimension maximum de leurs grains est bien inférieure à 0,5 mm.

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.

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



Fig. 21. — L'une des multiples usines à concasser des carrières de porphyre de Lessines. — Mise en stock automatique le long de la Dendre.



Fig. 21 bis. — Carrière de Porphyre de Lessines. — Chargeur mécanique de bateau le long de la Dendre.

de faire choix du sable de composition granulométrique appropriée aux qualités désirées pour les mortiers (n^{os} 40, 48 et 49).

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, c'est-à-dire comportant des éléments gros outre les fins et les moyens, 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.

Les caractéristiques données au tableau ci-après montrent que les sables *bien gradués* sont d'autant plus lourds à l'hectolitre et ont un vide d'autant moindre qu'ils sont 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.

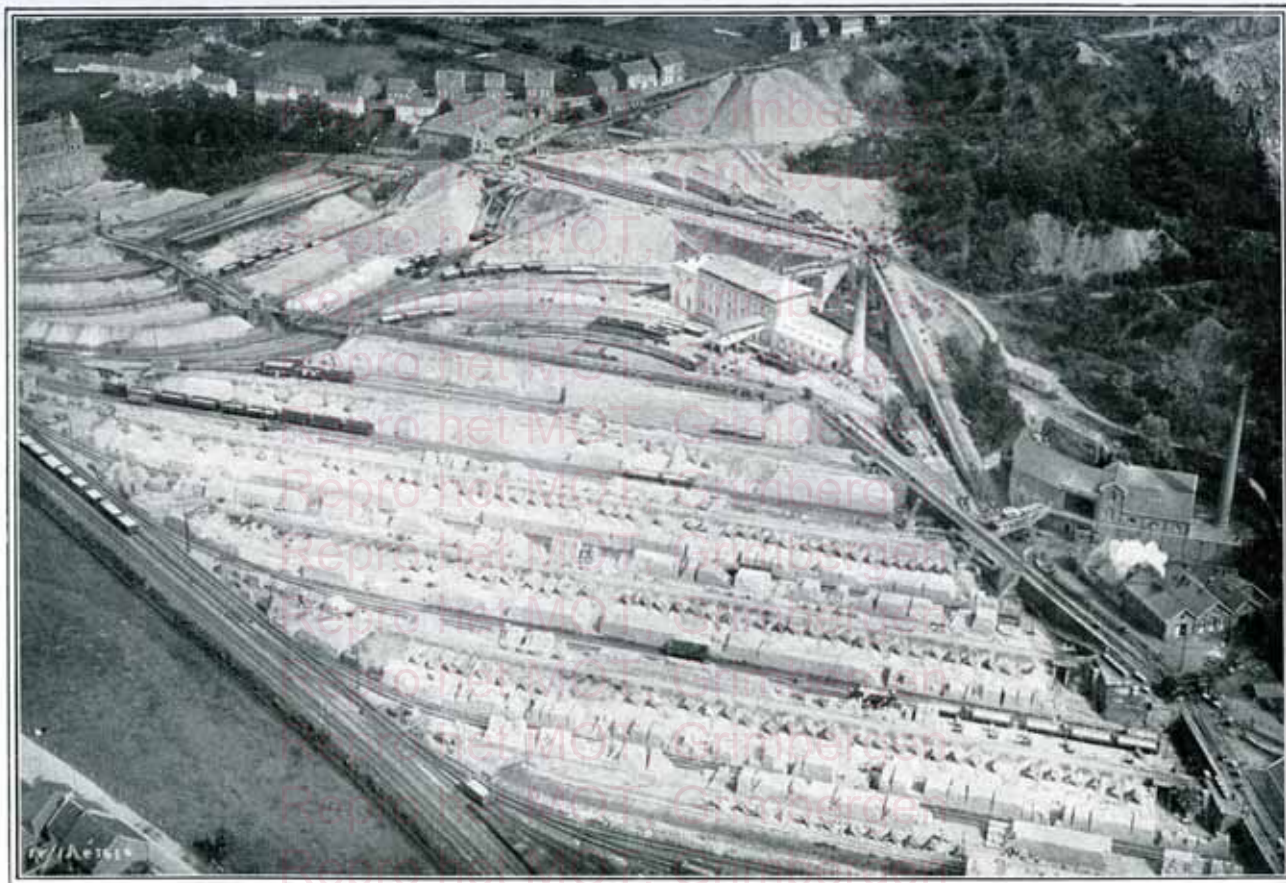


Fig. 22. — Carrières de porphyre de Quenast. — Vue générale des dépôts des pavés et «concessés».

(Reproduction interdite).

Cliché obligeamment prêté par «La Technique des Travaux».

25. — Caractéristiques de quelques sables et poussières.

DÉSIGNATION DES SABLES		Composition granulométrique en o/o				Poids et vides des sables			
						Sec non tassé		Sec tassé	
		Eléments supérieurs à 5 mm.	Gros 2/5 m/m	Moyen 0,5/2 m/m	Fin 0/0,5 m/m	Poids des 100 l. Kg. (1)	Vide en o/o (2)	Poids des 100 l. Kg. (2)	Vide en o/o (2)
I. PORPHYRE	Grenaille 2/5	—	100	—	—	131	52	166	38
	Poussier 0/5	—	40	27	33	160	41	200	27
	Poussier 0/3	—	5	56	39	145	48	190	30,5
II. QUARTZITE	Grenaille 2/8	36	48,8	7,7	7,5	125,7	51	155,5	39,45
	Poussier 0/5	—	20,8	44,7	34,5	145	44	193	25,3
III. GRÈS D'YVOIR	Grenaille 2/10	47	50	1,5	1,5	129	51,3	159	40
	Poussier de grès 0/5	—	14	41	45	149	42,6	184	28,1
IV. LAITIERS DE HAUT- FOURNEAU	Poussier 0/10	30	30	19	21	151	45,5	189	31,9
	Poussier 0 5	—	38	45	17	144	49	174	36,5
V. SABLE DU RHIN	Gros sable 2/5	—	100	—	—	148,5	43	172	33
	Tout-venant 0/5	—	7	78	15	155	41	172	33,2
	Tout-venant 0/5 (autre échant.)	10	25	53	12	170	35	—	—
VI. SABLE DE MEUSE	Gros sable 2/5	—	60	30	10	165,5	33,77	197,8	24,95
	Tout-venant 0/5	12	34	33	21	164	37	190	26,3
	Sable 0 2	—	—	82	18	147,4	41,6	173	31,8

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

(2) La détermination des vides est expérimentale.

25. — Caractéristiques de quelques sables et poussières (suite).

DES SABLES	DÉSIGNATION	Composition granulométrique en %				Poids et vides des sables			
		Eléments supérieurs à 5 mm.	Gros 2,5 m/m	Moyen 0,5/2 m/m	Fin 0/0,5 m/m	Sec non tassé		Sec tassé	
						Poids des 100 l. Kg. (1)	Vide en % (2)	Poids des 100 l. Kg. (1)	Vide en % (2)
VII. SABLES DE CARRIÈRES	Sable de Grand-Rosière	—	6	80	14	134	47,8	191	25,3
	Sable de Virginal	—	—	30 de 0,5/1 m/m	70	138	48,2	175	32,7
	Sable de Sart-Moulin 1 ^{er} choix	—	—	22	78	140	46	180	30,8
	Sable de Mont-St-Guibert	—	—	6	94	141	45,8	180	30,7
	Sable de Chaumont-Gistaux	—	—	1	99	140	46,4	172	34,0
	Sable blanc de Moll pour béton	—	—	14	86 dont 30 < 0,25 m/m	147	43,6	175	33,2
	Sable blanc de Moll : fin	—	—	—	100 dont 51,5 < 0,25 m/m	145	44,5	173	33,7
	Sable blanc de Moll très fin	—	—	—	100 dont 90 < 0,25 m/m	132	48,8	165	36,3
	Sable de Braine-le-Comte	—	—	3	97	137	47,6	177	32,3
	Sable de Selzaete	—	—	1	99	146	43,9	181	30,4
	Sable des env. de Woluwe	—	—	—	100 dont 95 < 0,3 m/m	136	48,6	165	37,3
	Sable Yprésien extrêmement fin	—	—	—	100 dont 90 < 0,1 m/m	120	54	152	41,2

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

(2) La détermination des vides est expérimentale.

QUALITÉS D'UN SABLE

26. — 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. Cette détermination se prête à une représentation graphique donnant la *courbe granulométrique* du sable (voir diagramme XI).

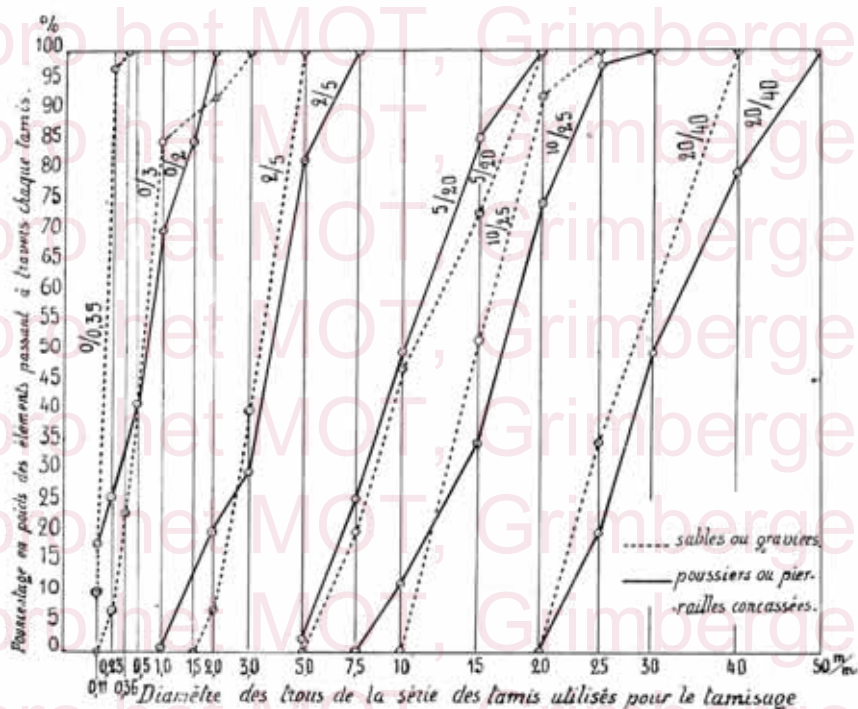


DIAGRAMME XI.

Courbe granulométrique de divers agrégats.

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 avec avantage quelques % de particules fines d'argile, de calcaire ou de limonite. Ces fines poussières contribuent à la plasticité et à la compacité des mortiers.

L'évaluation assez grossière de la proportion des particules tenues 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 (fig. 23). Tout ce qui est éléments tenus dans les sables et poussières n'est pas nécessairement nuisible. Les particules de limonite, de calcaire et les fines poussières se concassage des roches dures ne peuvent réduire les résistances que si elles sont abondantes, à cause de la grande quantité d'eau qu'elles exigent pour le gâchage du mortier ou du béton.



Fig. 23. — Couche de matières fines en dépôt sur le sable.

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.

27. — 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.

III. — PIERRAILLES

NATURE ET FORME DE LA PIERRAILLE

28. — 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



Fig. 24. — Carrières de quartzite de Dongelberg.

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 (fig. 26) 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.



Fig. 25. — Atelier de concassage et de triage des carrières de quartzite de Dongelberg.

Ces pierres concassées sont anguleuses, de formes très variées, depuis la forme voisine du cube, dont le type est le macadam, jusqu'à la forme esquilleuse, à arêtes très vives, qui se retrouve dans les plaquettes et le ballast.

Les plus utilisées en Belgique proviennent :

Des porphyres (fig. 19 à 22);

Des quartzites (fig. 24 et 25);

Des grès durs, et même des galets concassés (fig. 27).

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 briquillons, 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, 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, d'une qualité défectueuse des sables ou d'une proportion incorrecte de ceux-ci par rapport aux graviers, que de la forme même du gravier. Les galets peuvent donner des bétons de résistances à la compression, au moins égales à celles des bétons de pierres concassées. C'est avant tout une question de bonne granulométrie du béton (n^{os} 48 à 51). S'il s'agit de la résistance à la traction ou à la flexion, il semble que l'on doive donner la préférence aux pierrailles concassées.

COMPOSITION GRANULOMÉTRIQUE

29. — Comme pour le sable des mortiers, la composition granulométrique des pierrailles des bétons est très importante. Elle se détermine également par tamisage et peut donner lieu au tracé d'une courbe granulométrique (voir diagramme XI). 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 la proportion des éléments de moyenne et petite dimensions, mais c'est au détriment de la résistance (n° 50).

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° 41).



Fig. 26. — Elévateur Nilla pour sables et graviers extraits de la Meuse par la Société Anonyme d'Entreprise Générale de Travaux.

Vide des pierrailles. — En principe, le béton est d'autant plus 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^{os} 36 et 48).

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

Il diminue également quand on augmente la *grosseur maximum* de la pierraille, si celle-ci reste bien graduée.

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.



Fig. 27. — Usine de concassage de galets de la Société Anonyme d'Entreprise Générale de Travaux

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^{os} 35 à 38).

30. — Caractéristiques de quelques pierrailles.

DÉSIGNATION DE LA PIERRAILLE		Composition granulométrique en %				Poids et vide de la pierraille			
		Élé- ments supé- rieurs à 30 m/m	20/30 m/m	10/20 m/m	5/10 m/m	Sèche non tassée		Sèche tassée	
						Poids des 100 l. Kg. (1)	Vide en % (2)	Poids des 100 l. Kg. (1)	Vide en % (2)
CONCASSÉS DE PORPHYRE	Macadam 20/60	52	49	—	—	140	48,7	168	39,5
	Macadam 20/40	42	58	—	—	138	50	162	41,7
	Ballast 10/50	30	54	13	3	134	51	—	—
	Ballast 0/50	23	15	22	20	155	42,85	—	—
	Plaquettes 10/25	—	25	75	—	132	52,8	158	42,50
	Plaquettes 5/20	—	—	50	50	130,5	53	158,5	42
CONCASSÉ DE QUARTZITE	20/40	—	—	—	—	130	50,34	150,8	42,3
	5/20	—	—	—	—	126	52	153	41,5
CONCASSÉ DE GRÈS 10/25		—	29	68	3	125	52,3	—	—
CONCASSÉ DE LAITIER	8/20	—	3	71	26	127	54,3	—	—
	5/20	—	2	50	28	122	56	—	—
GALETS DU RHIN	20/40	45	55	—	—	146	43	167	36,2
	10/25	—	7	93	—	150	42	170	34,8
	5/20	—	—	53	47	155	40,5	174,5	33,5
	5/50 tout-venant	14	36	40	10	162	37,5	—	—
	10/40 tout-venant	26	23	42	9	154	41	—	—
	5/30 tout-venant	6	17	44	26	165	37	—	—
	2/25 tout-venant	—	7	20	41	163,5	37,5	—	—
GALETS DE MEUSE	20/40	27	73	—	—	153,2	40,8	170,4	34,7
	10/25	—	23	77	—	158	39,3	173,6	33,5
	5/20	—	21	65	14	161	37,7	175,1	32,55
	5/30 tout-venant	11	32	36	18 + 3 < 5 ^{mm}	166	35,5	—	—
GALETS DE MEUSE CONCASSÉS	20/40	88	12	—	—	140,2	46,2	150,4	30,7
	10/25	—	47	53	—	136,9	47,5	158,7	39,1
	5/20	—	8	58	34	137,4	46,3	165,5	36,3
	8/20 tout-venant	—	11	76	13	137	47	—	—

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

(2) La détermination des vides est expérimentale.

QUALITÉS D'UNE BONNE PIERRAILLE

31. — La pierraille doit :

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

2^o *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^o *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^o *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 ou argileuses 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

32. — 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 de différentes pierrailles, ainsi que les mélanges de pierraille et de sable, ce qui fausserait les dosages.

IV. — EAU DE GACHAGE QUALITÉ

33. — *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 % de sel marin;

Les eaux contenant plus de 3 % 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 %. Ces indications sont tirées de résultats d'expériences du professeur Duff A. Abrams.

Les eaux contenant plus de 5 à 6 % 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.

CHAPITRE II.

Dosage des mortiers et bétons.

I. — PRINCIPES DU DOSAGE

34. — 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.

II. — RICHESSE EN CIMENT

35. — 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.

III. — COMPOSITION GRANULOMÉTRIQUE DES MORTIERS ET DES BÉTONS

36. — 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. Les règles de détermination de la composition granulométrique des mortiers et bétons sont exposées au chapitre III, n^{os} 48 et suivants.

IV. — QUANTITÉ D'EAU DE GÂCHAGE

37. — 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 quan-*

tité 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 et 9). Voir chapitre IV. Résistance des bétons, n^{os} 58 et 59.

V. — CONCLUSION

38. — 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 %, 100 % 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. L'étude de ces facteurs est donnée en détail aux n^{os} 48 et suivants.

VI. — CHOIX DU DOSAGE DES MORTIERS ET DES BÉTONS

RICHESSE EN CIMENT

39. — La richesse en ciment 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 le travail auquel on le destine.

On trouvera aux n^{os} 54 et 55 des formules permettant de faire choix des dosages réalisant une richesse déterminée de ciment par mètre cube de béton mis en place.

Les dosages des bétons pour béton armé, avec diverses richesses de ciment et pour diverses matières inertes, peuvent se déduire directement des graphiques du n^o 57.

Enfin, les tableaux I, II, III, IV et V (fin de l'ouvrage) donnent les quantités de ciment et de matières inertes par mètre cube pour divers bétons, d'après l'usage auquel on destine ces bétons et les matériaux dont on dispose.

GROSSEUR MAXIMUM DES MATIÈRES INERTES

40. — *Pour Mortiers.*

Les sables gros (c'est-à-dire allant jusqu'à 5 mm.) 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 également 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.

41. *Pour Bétons.*

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.

Du 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.

Les règles fixant la granulométrie de ces matières inertes sont données aux n^{os} 48 et suivants.

QUANTITÉ D'EAU ET PLASTICITÉ

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 leur résistance.

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 à recevoir



Fig. 28. — 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.

un damage énergétique, aux bétons de consistance plus plastique pour lesquels le damage est encore nécessaire, mais peut être plus léger, et enfin aux bétons coulés dont il suffit de régaler la surface.

Mais il ne faut pas croire que la quantité d'eau est le seul facteur 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° 55).

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 28. 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. Le nombre de centimètres d'affaissement détermine la fluidité.

Une mesure plus exacte de la plasticité du béton peut être obtenue au moyen de la *table à secousses* (fig. 29).

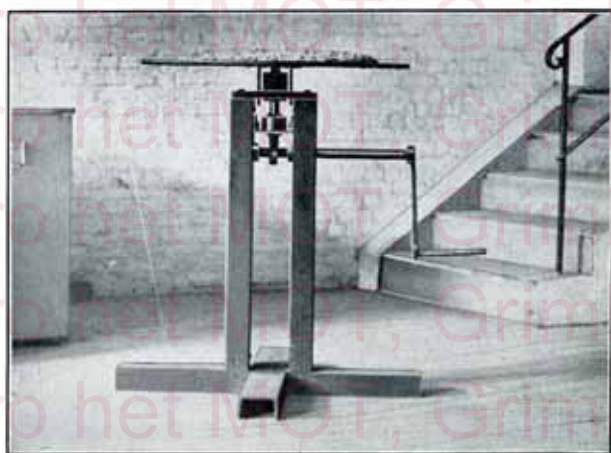


Fig. 29. — Table à secousses.

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. ou 12 — 18 — 24 cm.).

Ce tronc de cône est disposé et démoulé au centre de la table à secousse, à laquelle on fait subir, en dix secondes, 15 soulèvements et chutes successifs de 15 mm. 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 (fig. 30). On l'appelle *chiffre de fluidité* ou *fluidité*.



Fig. 30. — Moule pour la mesure de la plasticité du béton à la table à secousses. Bétons de plasticités différentes.

Sur chantier on peut employer avantageusement une table à secousses plus rudimentaire ⁽¹⁾ (fig. 31). Elle se compose de deux cadres en bois. Le cadre supérieur, recouvert d'une tôle formant table peut se soulever, puis retomber en tournant autour d'une arête. Le soulèvement maximum, qui est de 4 cm., est limité par un arrêteoir. Le nombre de soulèvements et de chutes est également fixé à 15 et le tronc de cône en béton est exécuté dans le même moule que pour la table précédente.

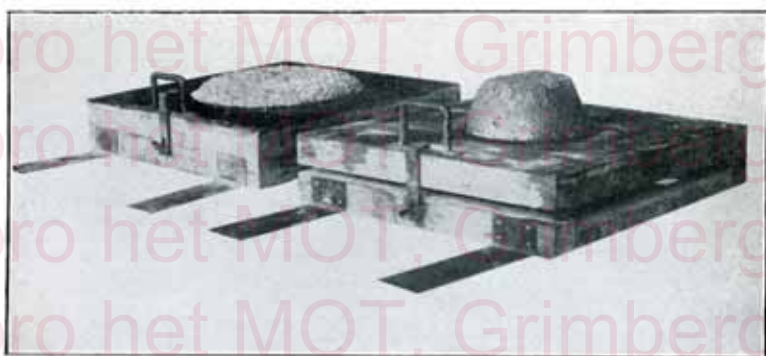


Fig. 31. — Table à secousses de chantier.

La concordance des résultats enregistrés sur les deux tables est très bonne. Enfin, lorsqu'il s'agit de *béton coulé*, la table à secousses peut encore convenir pour déterminer si le béton est suffisamment liquide, mais elle ne donne pas d'indication suffisante sur l'aptitude du béton à couler en gardant une homogénéité suffisante sans danger de séparation des matériaux. Pour juger de cette qualité particulière du béton, on peut avoir recours à un

(1) Appareil Graf.

appareil (fig. 32) constituant un élément de goulotte (1) de 1 m. 70 de longueur, auquel on donne l'inclinaison désirée pratiquement.

Nous croyons utile de définir ci-après ce que l'on entend par *diverses consistances plus ou moins plastiques des bétons*.



Fig. 32. — Goulotte d'essai pour béton coulé.

Le *chiffre de fluidité 1,2* répond à un béton de consistance raide (terre humide) qu'il convient de n'employer qu'exceptionnellement pour le béton armé, lorsqu'on peut le damer avec beaucoup de soin et qu'il ne comporte que peu d'armatures bien espacées.

La *fluidité 1,5* se rapporte à un béton de consistance plastique qui exige un damage soigné, mais plus facile à exécuter.

La *fluidité 1,7* correspond à un béton de consistance semi-fluide qui convient parfaitement pour l'exécution du béton armé dans les cas courants.

Il suffit de le « piquer » pour le mettre convenablement en place.

La *fluidité 2 à 2,2* correspond à un béton de consistance fluide dont

(1) Appareil Guttman.

l'emploi s'impose quand la mise en place du béton est difficile et quand les armatures sont très serrées. Il est encore nécessaire de « piquer » le béton ou de le tasser par secousses ou vibrations pour l'aider à remplir complètement les coffrages.

Un tel béton n'a pas encore la fluidité requise pour couler, c'est-à-dire qu'il est fluide sans être liquide.

La fluidité 2,3 à 2,5 répond à un béton de consistance liquide qui peut être coulé.

Au delà du rapport 2,6, il y a commencement de séparation des matériaux du béton.

Entre les essais de fluidité à la table à secousses et au cône d'affaissement on peut admettre les rapports suivants :

Fluidité à la table à secousses	Affaissement au slump test suivant la nature et la granulométrie du sable employé dans le béton		
	SABLE GROSSIER	SABLE FIN	POUSSIER
1,2	0 cm.	0 cm.	0 cm.
1,7	2 à 5 cm.	1,5 à 3 cm.	2 à 7 cm.
2,2	8 à 15 cm.	7 à 11 cm.	7 à 15 cm.

VII. — EXÉCUTION DES DOSAGES EN CHANTIER

43. — 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 habituellement 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, pour corriger une composition granulométrique défectueuse en vue de réaliser un béton de composition constante, il sera souvent nécessaire 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 poussières 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.

44. — 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.

45. — 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^o suivant le tassement au remplissage; 2^o 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.

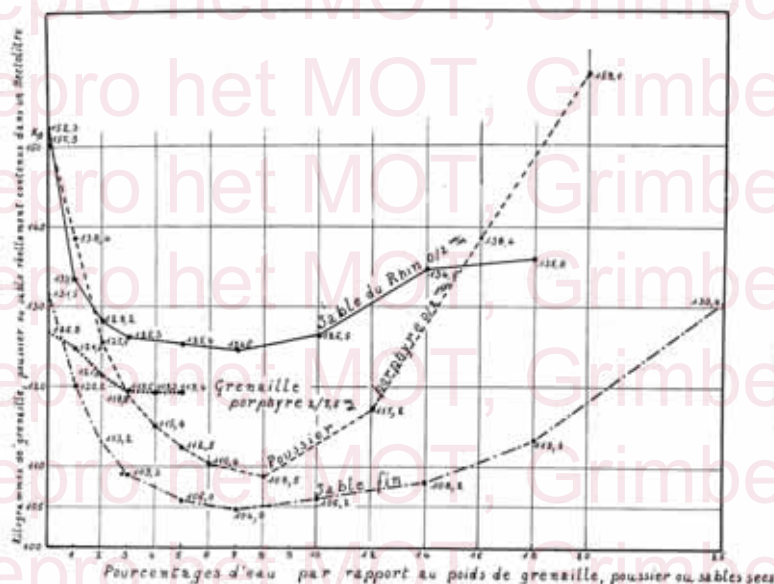


DIAGRAMME XII

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

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 XII 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 est en partie déduit de ce diagramme; il évalue le coefficient par lequel il faut multiplier le volume de sable ou poussier à l'état sec pour introduire dans les dosages la même quantité de ces matières à l'état humide.

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.*

Le dosage est beaucoup plus exact s'il s'effectue en poids et non en volume, cette méthode commence à trouver de nombreux partisans aux Etats-Unis.

Coefficients moyens par lequel il faut multiplier le volume de sable ou de poussier à l'état sec pour introduire dans les dosages la même quantité de ces matières à l'état humide.

Pourcentage d'humidité	Coefficient de multiplication		
	Poussier 0/2 à 0/3 mm.	Sable du Rhin ou de Meuse	Sable fin
0 ‰ état sec	1,00	1,00	1,00
1 ‰	1,13	1,13	1,10
2 ‰	1,22	1,19	1,16
3 ‰	1,29	1,22	1,20
4 ‰	1,33	1,22	1,23
6 ‰	1,38	1,23	1,25
8 ‰	1,38	1,22	1,26
10 ‰	1,31	1,20	1,24
12 ‰	1,25	1,18	1,23
14 ‰	1,14	1,15	1,21
16 ‰	1,06	1,13	1,18
18 ‰	1,00	1,11	1,15

46. — *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.

47. *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.

CHAPITRE III.

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

I. — DIAGRAMMES ET TABLEAUX DONNANT DES COMPOSITIONS GRANULOMÉTRIQUES TYPES DE BÉTONS A, B, C.

48. — 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'Ecole 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 nos 25 et 29. On peut utiliser ces données à défaut d'autres déterminations, mais il convient : 1° 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° 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 (%).

$\frac{d}{D}$	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

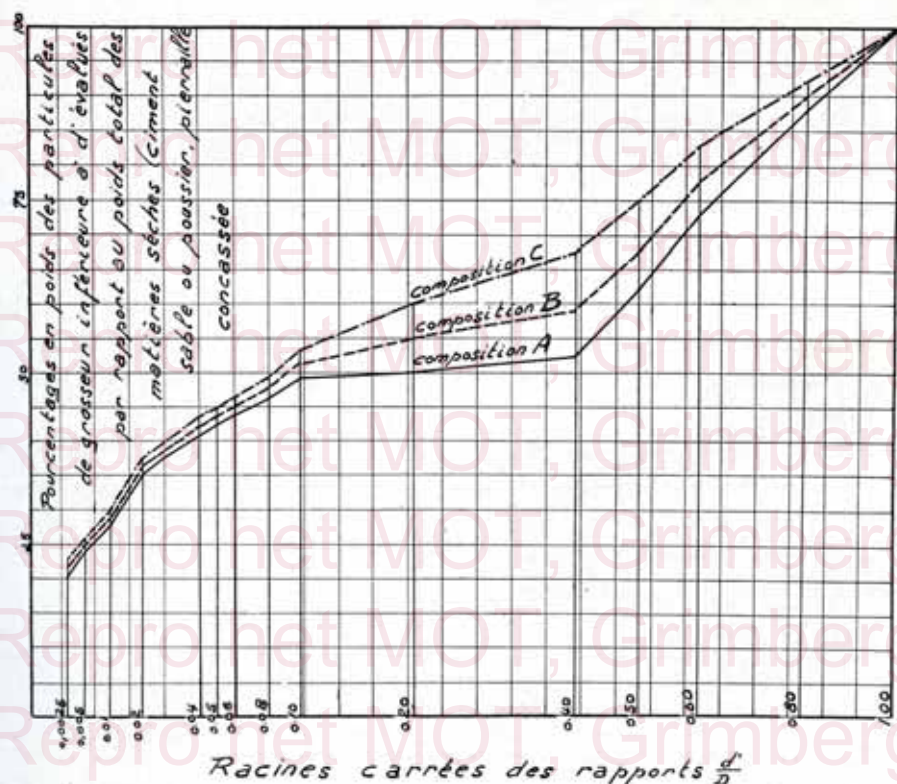


DIAGRAMME XIII.

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

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

II. — RÈGLES D'EMPLOI DES TABLEAUX DE COMPOSITION GRANULOMÉTRIQUE DES BÉTONS

CHOIX DE LA COMPOSITION GRANULOMÉTRIQUE

49. — 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 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.

volume absolu d'un poids déterminé de matières 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 « Revue 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.

Composition C. — Ces bétons sont plastiques et d'exécution très comode. 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 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

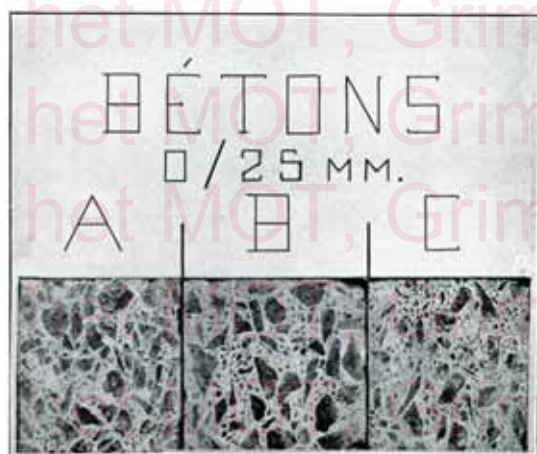


Fig. 33. — Coupes montrant la variation de composition de trois bétons A, B et C, de plaquettes de porphyre 10/25.

siliceux, pour les poussières et pierrailles concassés 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.

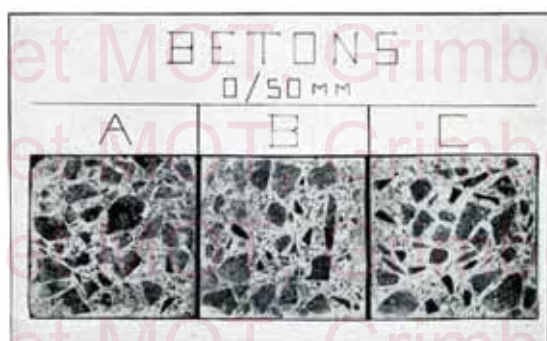


Fig. 34. — Coupes montrant la variation de composition de trois bétons A, B et C, de macadam de porphyre 20/50.

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 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.

50. — 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 « concassés » 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 qui répond 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) *Éléments fins* : sables ou poussières formés :

— Soit uniquement de grains $\leq 0,5$ 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 milli-

mètres, 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) *Éléments intermédiaires* comportant :

— Du sable gros, du gravillon ou de la grenaille de pierres concassées, 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) *Éléments 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 maté-

riaux 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 0,04 D à D;

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	0	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:

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

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

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

$$\text{Total.} \dots\dots\dots 100,00 \%$$

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'aussi près que possible, si l'on désire exécuter du béton coulé, afin de maintenir l'homogénéité de composition au cours de la coulée.

(*) Y compris le ciment.

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 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 donnée à la fin du n° 56.

51. — 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 retiennent qu'une proportion de 5 % environ.

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

52. — *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 % de ciment; la grosseur maximum de la pierraille est D. On peut admettre comme proportions convenables en poids pour le squelette seul:

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

53. — *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 »

III. — 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.

54. — 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 *a priori* le pourcentage de ciment nécessaire pour amener la richesse désirée par mètre cube de béton exécuté.

$$C \% = \frac{37.3}{1000 - \frac{1}{\left(\frac{C}{E}\right)} + 0.053} \quad (1)$$

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

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

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

Les valeurs de $\left(\frac{C}{E}\right)$ sont déduites de la formule et des indications données au n° 55.

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

$$N = \frac{1000}{\frac{37.3}{C \%} + \frac{1}{\left(\frac{C}{E}\right)} - 0.053} \quad (2)$$

IV. — CALCUL DES QUANTITÉS D'EAU A EMPLOYER POUR DES BÉTONS DE COMPOSITION A, B OU C.

55. — 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 $\frac{C}{E} = \frac{\text{Poids ciment}}{\text{Poids eau}}$.

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

$$\frac{1}{\left(\frac{C}{E}\right)} = k \times m \times m_1 \times m_2 \left(\frac{9.5}{C\%} + 0.05 \right) \quad (3) \quad \left. \begin{array}{l} \text{Béton} \\ \text{de pierrailles} \\ \text{concassées.} \end{array} \right\}$$

$$\frac{1}{\left(\frac{C}{E}\right)} = \frac{k \times m \times m_1 \times m_2 \left(\frac{257}{N} + 0.063 \right)}{1 + 0.257 \times m \times m_1 \times m_2} \quad (4)$$

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

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 composition granulométrique du sable ou poussier et de la forme des grains.

m₂ = coefficient dépendant de la composition de béton choisie.

k = coefficient tenant compte de la plasticité désirée pour l'exécution du béton, c'est-à-dire du chiffre de fluidité n° 42.

Valeur du coefficient k.

k	Chiffre de fluidité du béton à la table à secousses	
1,00	1,20	consistance raide
1,05 à 1,10	1,50	consistance plastique
1,15 à 1,20	1,70	consistance semi-fluide
1,20 à 1,25	2,00	consistance fluide
1,25 à 1,30	2,20	
1,30 à 1,35	2,40	

Valeurs des coefficients $m - m_1 - m_2$ (pierraille concassée) :

GROSSEUR MAXIMUM de la pierraille	m	SABLE OU POUSSIER	m_1	COMPOSITION DU BÉTON	m_2
5 m/m	1,12	Poussier 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	B	1,05
25 m/m	0,83				
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	C	1,10

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 %.

V. — QUELQUES EXEMPLES D'APPLICATION DE CES RÈGLES

56. — 1^{er} EX.: DOSAGE D'UN BÉTON COMPORTANT LES MATÉRIAUX SUIVANTS:

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

Composition Bc (n° 48) :

40 mm.	D	100 %
20 mm.	$d = 0,5 \quad D$	68 %
5 mm.	$d = 0,125 \quad D$	42 %
2 mm.	$d = 0,05 \quad D$	35 %

Dosage correspondant:

En poids		En volume (°)
100 — 68 = 32 %	846 kgr.	20/40 600 l.
68 — 42 + $\frac{42 - 35}{2}$ = 29,5 %	780 kgr.	5/20 600 l.

(1) Poussier de porphyre, de quartzite ou de grès contenant 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.

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

$$\frac{42-35}{2} + 35 - 17 = 21,5 \%$$

570 kgr.	0/2	390 l.
$\frac{17}{100} \%$	450 kgr.	ciment 450 kgr.

Rapport : $\frac{C}{E}$

$$\left(\frac{C}{E}\right) = 1,10 \times 0,78 \times 1,00 \times 1,07 \left(\frac{9,5}{17} + 0,05\right) = 0,560 \text{ [Formule (3),$$

$$\text{n° 55]} \text{ d'où } \frac{C}{E} = 1,78.$$

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° 54)]

Quantité d'eau de gâchage:

$0,560 \times 50 = 28$ litres par gâchée comportant un sac de ciment de 50 kilogrammes (si tous les matériaux sont parfaitement secs).

2° Ex.: DOSAGE D'UN BÉTON COMPOSÉ 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 $\frac{C}{E}$:

$$\left(\frac{C}{E}\right) = 1,00 \times \frac{0,93 \times 0,90 \times 1,07 \left(\frac{257}{350} + 0,063\right)}{1 + 0,257 \times 0,93 \times 0,90 \times 1,07} = 0,581 \text{ [Formule (4), n° 55)]}$$

$$\text{d'où } \frac{C}{E} = 1,72.$$

Pourcentage en ciment :

$$C\% = \frac{37,3}{\frac{1000}{350} - 0,581 + 0,053} = 16 \%$$

Composition Bc (n° 48) :

20 mm.	D	100 %
5 mm.	d = 0,25 D	51 %
2 mm.	d = 0,1 D	40 %
0,4 mm.	d = 0,02 D	27 %

Dosage correspondant :

En poids			En volume (1)
$100 - 51 =$	49 %	1,130 kg.	5/20 870 l.
$51 - 40 + \frac{40 - 27}{2} =$	17,5 %	405 kgs	2/5 310 l.
$\frac{40 - 27}{2} + 27 - 16,0 =$	17,5 %	405 kgs	0/0,4 310 l.
	16,0 %	370 kgs	ciment 370 kgs
	100,0 %		

Quantité d'eau de gâchage:

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

Si, par exemple, le sable fin contenait 10 % 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 % pour tenir compte du foisonnement dû à l'humidité (n° 45).

3° Ex.: MORTIER CONSTITUÉ DE :

Grenaille 2/5; sable du Rhin 0/2; ciment 16,25 %.

Mortier de consistance semi-fluide.

Composition Ac (n° 48) :

5	D	100 %
2	d = 0,40 D	51 %

Dosage correspondant:

En poids		En volume (1)
$100 - 51 = 49$ %	1.060 kgs 2/5	820 l.
$51 - 16,25 = 34,75$ %	750 kgs sable Rhin 0/2	490 l.
16,25 %	350 kgs ciment	350 kgs

Rapport : $\frac{C}{E}$.

$$\frac{1}{\left(\frac{C}{E}\right)} = 1,15 \times 1,12 \times 0,83 \times 1,00 \left(\frac{9,5}{16,25} + 0,05 \right) = 0,678$$

[Formule (3), n° 55]

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

$$\text{d'où } \frac{E}{C} = 1,47$$

Richesse en ciment :

$$N = \frac{1,000}{\frac{37,3}{16,25} + 0,678 - 0,053} = 342 \text{ kgs de ciment par mètre cube de mortier [Formule (2), n° 54]}$$

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 % et 5 % d'eau, le dosage en eau par sac de ciment devrait être réduit de :

$$0,03 \times \frac{1,060 \times 50}{350} + 0,05 \times \frac{750 \times 50}{350} = 4,53 \times 5,37 = 9,9 \text{ litres.}$$

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 % et de 18 % pour tenir compte du foisonnement dû à l'humidité (n° 45).

4° Ex.: DOSAGE D'UN BÉTON DE GALETS DONT LE SQUELETTE N'EST CONSTITUÉ QUE PAR DEUX LOTS DE MATÉRIAUX COMPORTANT DES GROSSEURS COMMUNES.

Proportion de ciment : 15 % en poids.

Composition : Bg.

Granulométrie des matériaux de rivière.

Diamètre d 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 d .	Gravillon .	7	20	40	50	65	75	90	95	100	100	100
	Galets .	0	0	0	0	3	10	20	54	60	85	96

De 5 à 15 mm., ces deux matériaux comportent des éléments de mêmes dimensions. 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 mm.

10 mm.

20 mm.

se rapprochent le plus de ceux qui sont donnés par la composition théorique

Bg pour les valeurs de $\frac{d}{D}$ égales à :

$$\frac{2}{30} = 0.066;$$

$$\frac{10}{30} = 0.333;$$

$$\frac{20}{30} = 0.666.$$

C'est ainsi que pour $a = 7,5$ mm. ou $\frac{a}{D} = 0,250$, la composition Bg

indique qu'il faut prendre 50 % 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 mm., on obtient les proportions de galets et de gravillon renseignées au tableau suivant :

a m/m	$\frac{a}{D}$	Pourcentages en poids des particules $\leq (a)$ déduits de la composition Bg.	Pourcentages en poids correspondant 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 $a = 7,5 \text{ mm.}$, par exemple, on trouve, en se basant sur les compositions granulométriques du gravillon et des galets, que :

— Les éléments $\leq 2 \text{ mm.}$ se composent de :

15 % de ciment + 50 % des 35 % de gravillon,
soit $15 + 0,5 \times 35 = 15 + 17,5 = 32,5 \text{ \%}$.

— Les éléments $\leq 10 \text{ mm.}$ comportent :

15 % ciment + $0,90 \times 35 \text{ \%}$ gravillon + $0,2 \times 50 \text{ \%}$ galets,
soit $15 + 31,5 + 10 = 56,5$.

— Les éléments $\leq 20 \text{ mm.}$ comprennent :

15 % ciment + 35 % gravillon + $0,6 \times 50 \text{ \%}$ galets,
soit $15 + 35 + 30 = 80 \text{ \%}$.

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

2 mm. 10 mm. 20 mm.

ou pour :

$$\frac{d}{D} = 0,066 \qquad 0,333 \qquad 0,666$$

La composition théorique Bg donne respectivement :

31,6 % $\leq 2 \text{ mm.}$; 53 % $\leq 10 \text{ mm.}$; 78,6 % $\leq 20 \text{ mm.}$

En procédant pour $a = 5 \text{ mm.}$ comme il a été fait pour $a = 7,5 \text{ mm.}$, on obtient les résultats consignés ci-dessous :

Valeur de a réalisant la séparation fictive	Pourcentages des matériaux de dimensions inférieures à		
	$d = 2 \text{ m/m}$ ou $\frac{d}{D} = 0,066$	$d = 10 \text{ m/m}$ ou $\frac{d}{D} = 0,333$	$d = 20 \text{ m/m}$ 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 $a = 6 \text{ mm.}$, on obtient $\frac{a}{D} = \frac{6}{30} = 0,20$.

Pour $\frac{d}{D} = 0,20$, la composition B_g donne 47 %.

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

Galets:	100 — 47 =	53 %
Gravillon:	47 — 15 =	32 %
Ciment:		15 %
		100 %

Ce dosage répond à une composition qui se rapproche très bien de la courbe théorique B_g 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	
B_g	100	—	88	—	74	68	59	—	—	47	—	36
Béton de gravier calculé		92		78,8		74						

d/D	0,08	0,666	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
B_g	33		31	30	28		23		20		16
Béton de gravier calculé						27,8					

Remarque : Consulter à la fin de l'ouvrage les tableaux I, II, III, IV et V donnant « quelques dosages et compositions des mortiers et des bétons », d'après l'usage auquel on les destine et les matériaux dont on dispose.

VI. — GRAPHIQUES DONNANT DIRECTEMENT LES DOSAGES DES BÉTONS POUR BÉTON ARMÉ

57. — Les graphiques numérotés XIV à XVIII donnent tous renseignements utiles sur les compositions des dosages et la valeur du rapport $\frac{C}{E}$

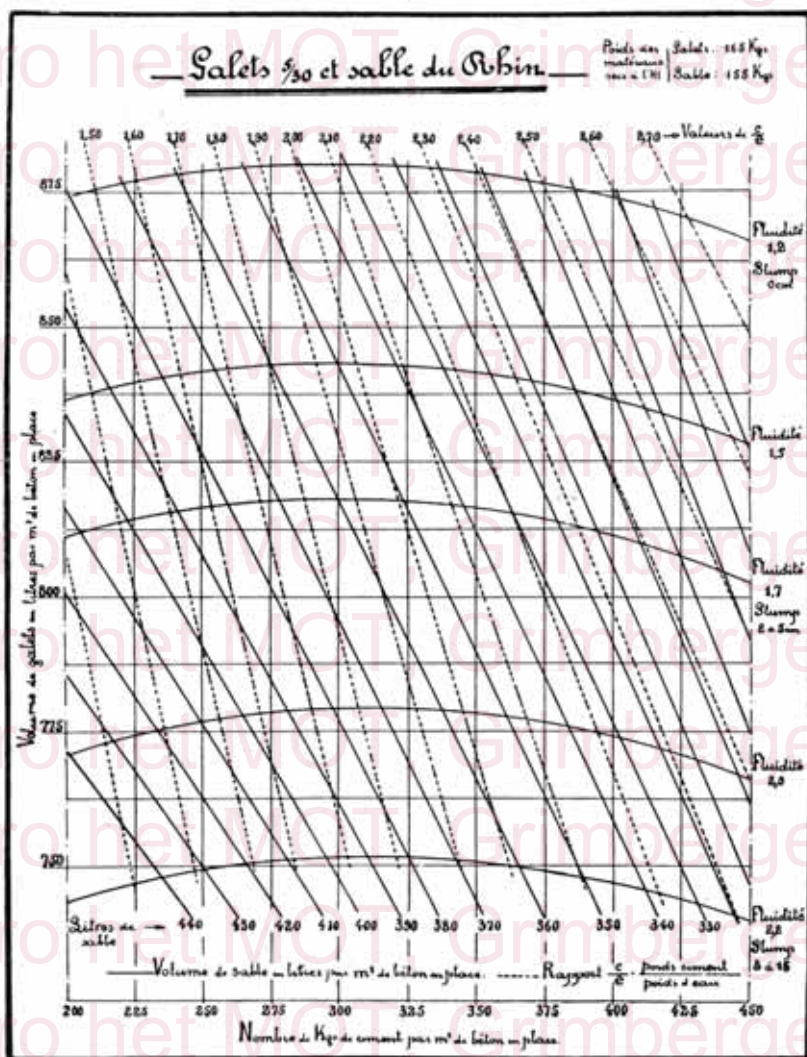


DIAGRAMME XIV.

des bétons à richesse variable en ciment, à diverses fluidités et comportant les matériaux couramment employés suivants :

Galets 5/30 mm.

Sable du Rhin 0/5 mm.

Plaquettes de porphyre 5/20 mm.

Sable du Rhin 0/5 mm.

Plaquettes de porphyre 5/20 mm.

Poussier de porphyre 0/2 à 0/3 mm.

Galets 5/30 mm.

Sable fin 0/0,5 mm.

Plaquettes de porphyre 5/20 mm.

Sable fin 0/0,5 mm.

La richesse en ciment de ces bétons varie de 200 à 450 ou 500 kgs par m³ de béton mis en place.

Le sable fin des diagrammes n^{os} XVII et XVIII laisse passer 90 % de grains au tamis à trous circulaires de 0,5 mm. de diamètre, c'est-à-dire

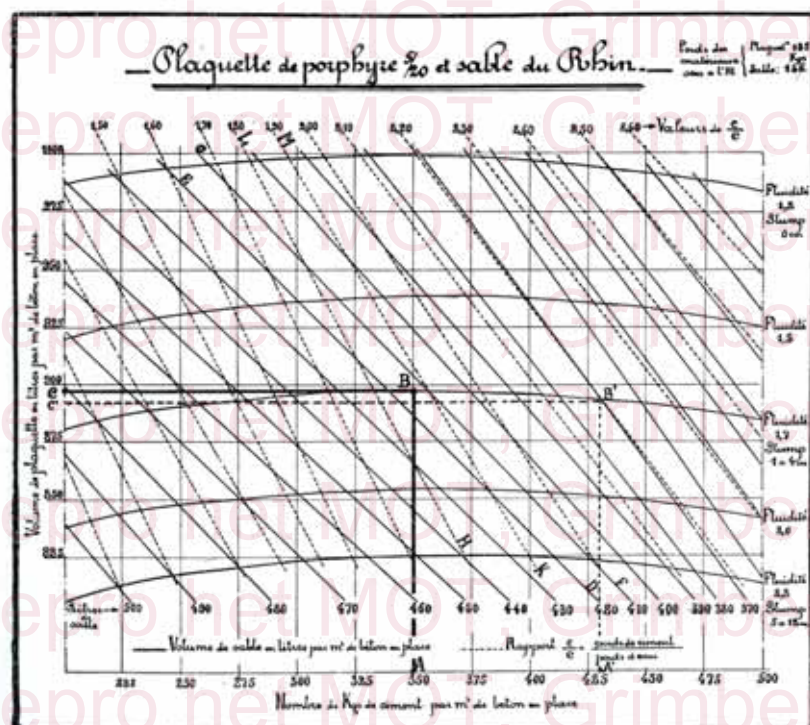


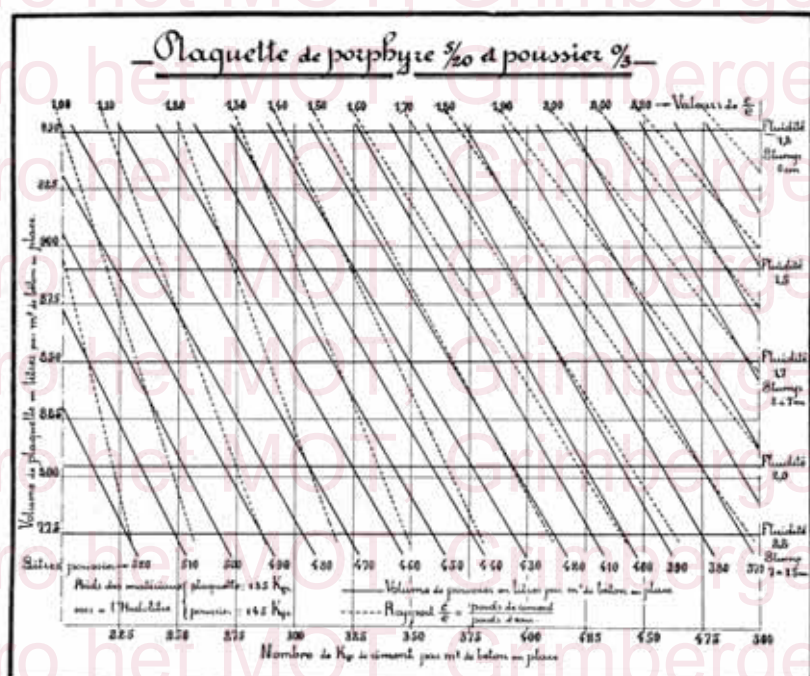
DIAGRAMME XV.

qu'il correspond à ce que l'on appelle commercialement, parmi nos sables fins, un sable à béton. Nous insistons sur la granulométrie de ce sable, parce que beaucoup de sables de nos carrières sont plus fins et même excessivement fins,

si bien que les données des diagrammes n^{os} XVII et XVIII ne s'appliqueraient pas à des bétons utilisant ces derniers sables (1).

Pour les matériaux désignés, ces graphiques donnent, suivant la fluidité désirée et pour 1 m³ de béton mis en place :

- 1^o Le volume en litres de pierrailles concassées ou de galets, suivant l'axe vertical des ordonnées;
- 2^o La quantité de ciment en kgs suivant l'axe horizontal des abscisses;
- 3^o Le volume de sable, en litres, déterminé d'après les indications des lignes obliques en trait plein et suivant la position du point répondant à la richesse en ciment et à la fluidité désirées.



Les volumes des sables s'entendent pour des matériaux secs ayant à l'hectolitre les poids indiqués sur chaque diagramme. Ces valeurs seront corrigées en conséquence si les sables employés ont des poids différents à l'hectolitre; s'ils contiennent un certain pourcentage d'humidité, nous savons

(1) Additionnés de grenaille ou de sable grossier, ces sables très fins conviennent très bien pour les bétons, mais les dosages et les valeurs de $\frac{C}{E}$ qui en résultent sont différents de ceux donnés aux diagrammes XVI et XVIII (voir n^{os} 54, 55 et 56, 2^e exemple).

par le n° 45 que la correction à apporter au dosage en volume peut être importante et qu'il faut en tenir compte sur chantier;

4° La valeur du rapport : $\frac{C}{E} = \frac{\text{poids de ciment}}{\text{poids d'eau}}$. La quantité d'eau en dénominateur est celle qui a été additionnée au cours de l'essai en laboratoire pour obtenir avec des matériaux (sable et pierrailles) parfaitement secs la fluidité voulue. La valeur du rapport $\frac{C}{E}$ se lit d'après les indications des lignes obliques en pointillés.

Exemple d'application : Supposons qu'il s'agisse de déterminer les quantités de matériaux nécessaires pour obtenir, avec des plaquettes de porphyre

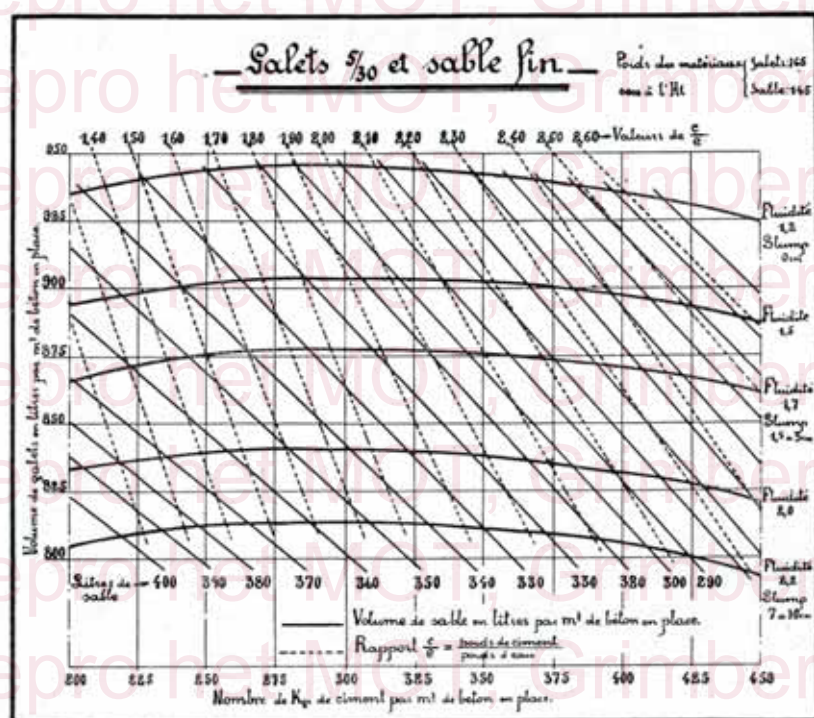


DIAGRAMME XVII

5/20 et du sable du Rhin, un béton contenant 350 kgs de ciment au m³ et présentant une fluidité 1,7. Sur l'axe horizontal du graphique XV prenons le point A indiquant 350 kgs de ciment et traçons à partir de ce point une verticale qui coupe la courbe de fluidité 1,7 en B. L'horizontale BC donne le volume de plaquettes 5/20, soit 895 l. Le point B se trouve situé entre

les droites obliques DE et FG indiquant respectivement 420 et 410 litres de sable du Rhin; le volume de sable est donc de 415 l. environ.

Les quantités de matériaux qui entrent dans un mètre cube de béton sont donc :

895 l. plaquette 5/20 de porphyre.

415 l. sable du Rhin.

350 kgs ciment.

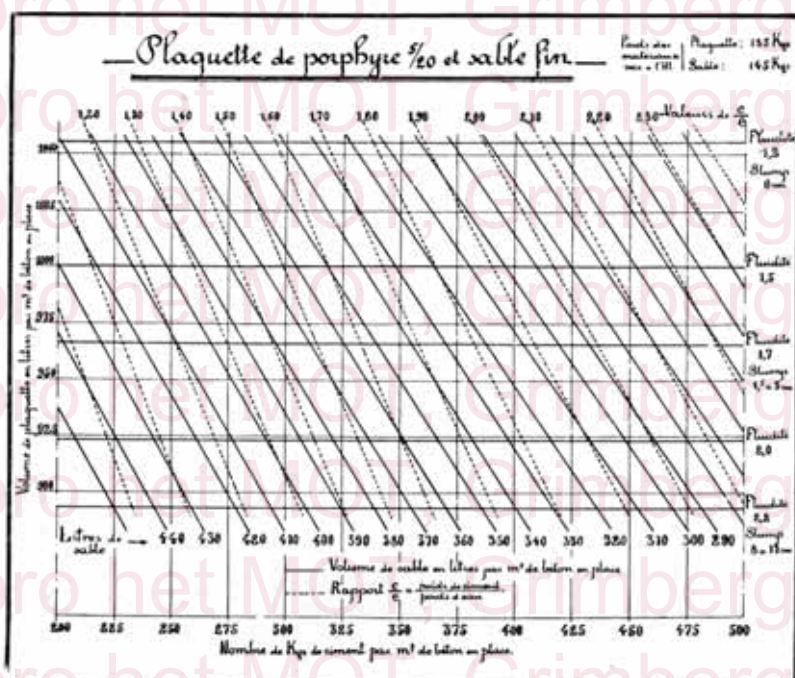


DIAGRAMME XVIII.

Ce même point B situé dans l'intervalle des droites en pointillé HL et KM, donne pour le rapport $\frac{C}{E}$ une valeur comprise entre 1,80 et 1,90 soit 1,87.

La quantité d'eau de gâchage à prévoir pour des matériaux secs est donc de $E = \frac{C}{1,87} = \frac{350}{1,87} = 187$ litres par m³ de béton.

CHAPITRE IV.

Résistance des bétons.

58. Comme on le sait, c'est la résistance des bétons à la compression qui est la plus importante à considérer; leur résistance à la traction étant faible, on n'en tient généralement pas compte dans les calculs des ouvrages.



Fig. 35. — Remplissage des moules métalliques et damage des cubes de béton destinés à l'essai de compression.

La résistance à la compression se détermine sur des éprouvettes cubiques de 15 à 30 cm. de côté (fig. 36). Généralement, c'est le cube de 20 cm. de côté qui est employé, celui de 30 cm. étant réservé aux bétons constitués de gros éléments supérieurs à 40 mm.

Pour obtenir de bons résultats, il convient de faire usage de moules métalliques plutôt que de moules en bois, de façon à obtenir des arêtes bien vives et des faces parfaitement unies et parallèles, s'appliquant bien sur les plateaux de la machine d'essai (fig. 35 et 37).

La détermination de la résistance est utile afin de fixer au préalable les dosages du béton d'après son taux de travail, d'après les matériaux et le ciment employés, ainsi que d'après la fluidité à lui donner. Cette détermi-

tion de la résistance est nécessaire au cours des travaux comme contrôle régulier de la qualité du béton.

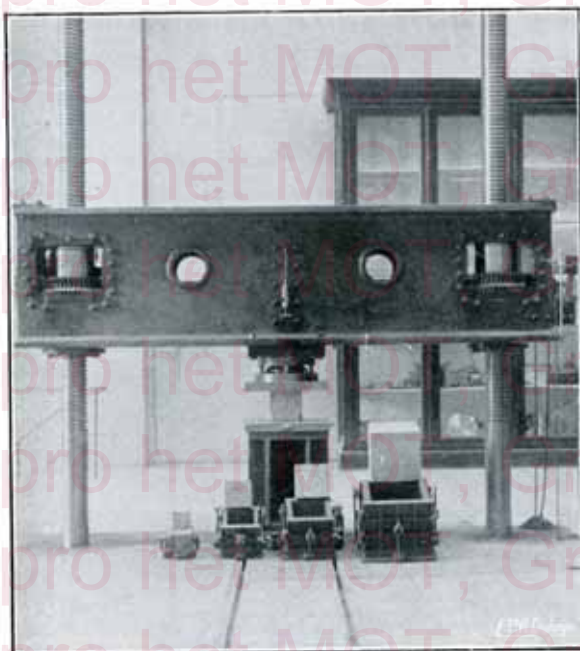


Fig. 36. — Presse de 300 tonnes et moules pour la détermination de la résistance à la compression des cubes de béton.

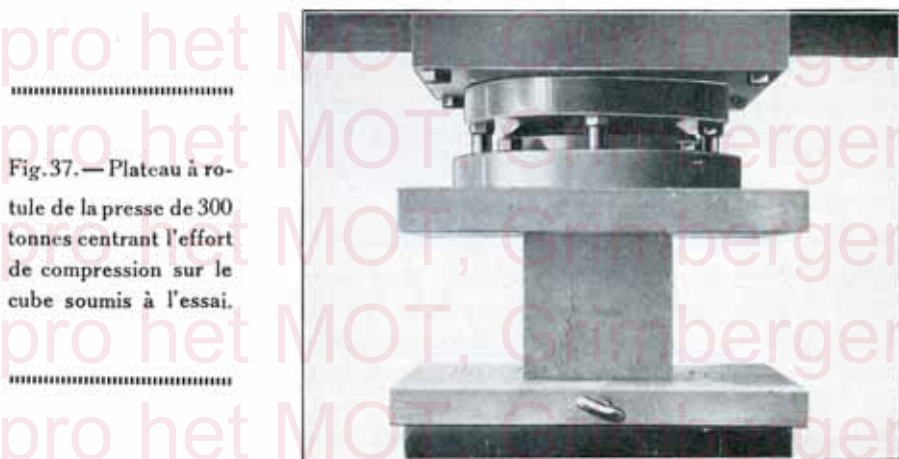


Fig. 37. — Plateau à rotation de la presse de 300 tonnes centrante l'effort de compression sur le cube soumis à l'essai.

LOI DE RÉSISTANCE DES BÉTONS

59. — La détermination de la résistance des bétons en fonction du dosage est une question qui retient de plus en plus l'attention, étant donné

que l'on désire construire de plus en plus vite, plus économiquement et plus rationnellement.

Les facteurs principaux de la résistance d'un béton sont :

- 1° la nature, la forme et la granulométrie du squelette;
- 2° la qualité et la quantité du ciment;
- 3° la quantité d'eau;
- 4° l'âge;
- 5° les conditions d'exécution et de durcissement.

Dans l'estimation *a priori* de la résistance du béton, nous laisserons de côté ce cinquième facteur, qui est très variable, sur chantier, et nous supposons qu'il s'agit de bétons exécutés au laboratoire dans des conditions normales d'essai. *Pour passer aux conditions du chantier, il y a lieu d'appliquer aux résultats de laboratoire un coefficient de correction dont l'importance tend d'autant plus à diminuer que le chantier apporte plus de soin à l'exécution correcte des dosages. Cependant la résistance du béton dépend en plus de la température et des conditions de durcissement (nos 72 à 74).*

Le fait de pouvoir déterminer la résistance du béton avec une approximation donnée ne doit du reste pas atténuer la *nécessité de faire le contrôle de la qualité du béton sur chantier*; bien au contraire, ce contrôle doit être d'autant plus serré et sévère que l'on exige davantage du béton mis en œuvre et que l'on se montre plus hardi dans la conception des ouvrages.

Il ne faut donc voir dans l'aide apportée par les indications suivantes qu'un *guide sûr* qui doit permettre de réduire les tâtonnements dans la recherche du dosage d'un béton de résistance déterminée.

Diverses formules ont été établies par plusieurs expérimentateurs en vue de déterminer la résistance Z du béton en fonction des facteurs exprimés ci-dessus.

Elles s'expriment en fonction du rapport $\frac{C}{E}$ ou de son inverse, l'eau et le ciment, les deux éléments principaux du béton, y étant exprimés soit en poids, soit en volume.

La formule la plus simple est la suivante, qui a été présentée par la *Commission suisse du béton coulé*.

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

Z = Résistance à l'écrasement en kg/cm^2 déterminée sur cubes de 20 cm. de côté.

$\frac{C}{E} = \frac{\text{poids de ciment}}{\text{poids d'eau}}$. Sa valeur se déduit des formules (3) ou (4)

n° 55.

K et K' sont deux constantes qui dépendent en ordre principal :

- de la nature et de la forme des matières inertes;
- de la qualité du ciment;
- de l'âge du béton.

On suppose implicitement que les bétons ont été exécutés et ont durci dans de bonnes conditions.

Cette formule est d'application pour des bétons bien pleins, exécutés avec une consistance plastique à liquide et ayant une bonne granulométrie telle que celle qui correspond à l'une des compositions A, B ou C. Dans ces conditions, elle donne au laboratoire des résistances expérimentales qui s'écartent au maximum de $\pm 10\%$ des résistances calculées (diagramme XIX) tant que les valeurs de $\frac{C}{E}$ restent comprises entre

$$1.00 \leq \frac{C}{E} \leq 2.50$$

Ces valeurs de $\frac{C}{E}$ correspondent à des bétons dont la richesse en ciment va de 200 à 500 kgs par m³. Tous les autres facteurs étant constants, si l'on

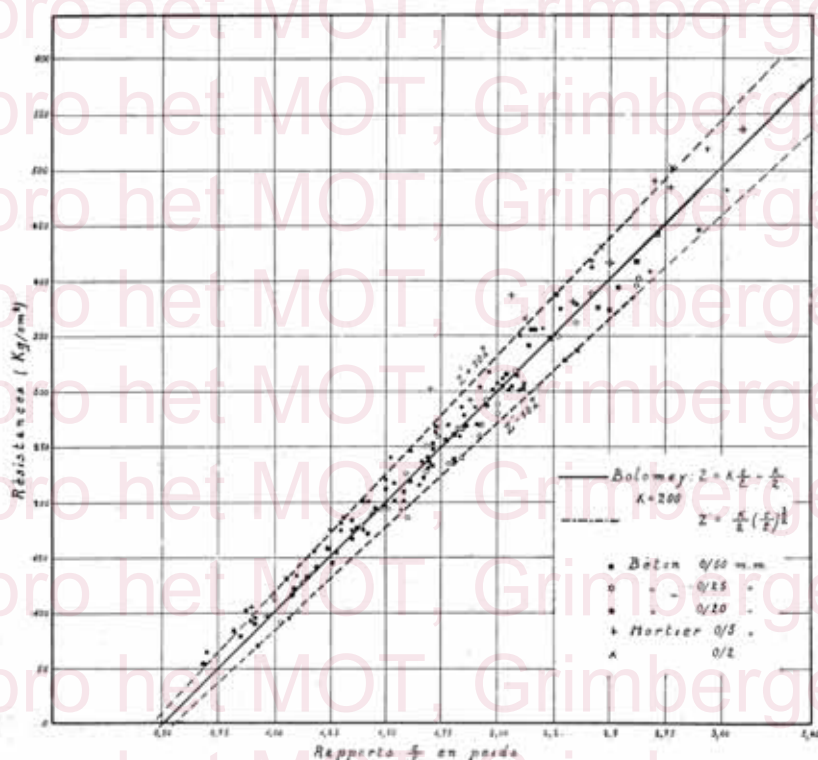


DIAGRAMME XIX.

modifie la nature et la forme des matières inertes du béton, les valeurs de K et K' varient comme le montre le diagramme XX.

Si l'on veut donc faire abstraction de la variation des matériaux et ne plus tenir compte dans la formule que de l'âge du béton et de la qualité du

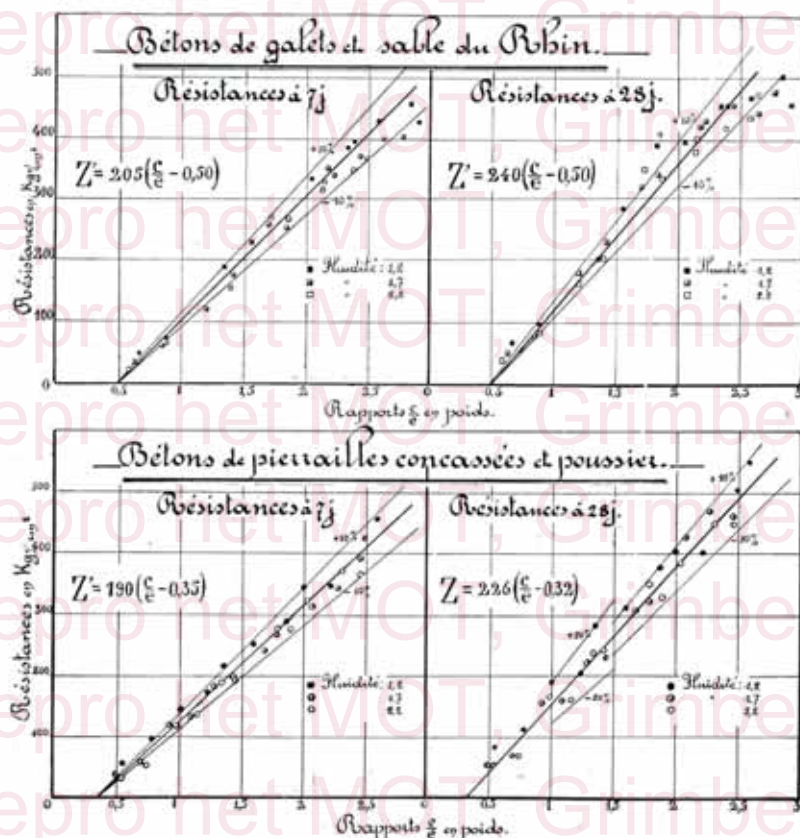
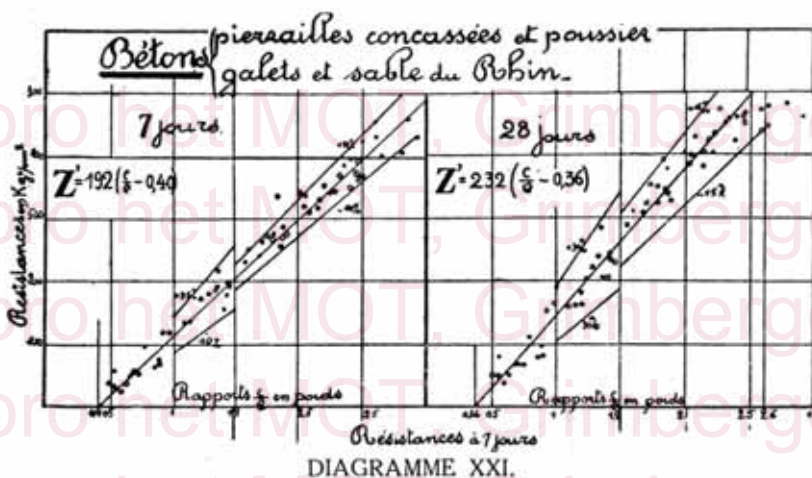


DIAGRAMME XX.

ciment (diagramme XXI), on est amené à restreindre l'application de la formule générale aux bétons dont le $\frac{C}{E}$ est compris entre :

$$1.30 \leq \frac{C}{E} \leq 2.50$$

et les résistances obtenues expérimentalement peuvent parfois s'écarter jusqu'à $\pm 20 \%$ de valeurs calculées. A ces valeurs de $\frac{C}{E}$ correspondent des bétons dont la richesse en ciment va encore de 250 à 300 kgs jusqu'à 500 kgs par m^3 , c'est-à-dire tous les bétons mis en œuvre dans les travaux en béton armé.



ESTIMATION DE LA RÉSISTANCE DES BÉTONS. VALEURS DE K ET K'.

60. — Si l'on ne possède *a priori* aucune indication sur les valeurs de K et K' la détermination d'un dosage répondant, pour un âge et un ciment donnés, à une résistance minimum fixée, ne peut se résoudre qu'expérimentalement de la façon suivante :

Avec les matériaux et le ciment choisis, on exécute au moins 6 bétons répondant à des richesses et au besoin à des fluidités différentes de telle sorte que ces bétons aient des valeurs de $\frac{C}{E}$ qui s'échelonnent de 1,00 à 2,50.

Ayant déterminé les résistances de ces bétons à l'âge choisi, on porte ces dernières sur un diagramme en fonction des valeurs de $\frac{C}{E}$ et l'on trace la droite probable définie par la loi (5), ce qui fixe les valeurs de K et de K'.

Partant de cette loi, on peut alors déterminer le rapport $\frac{C}{E}$ qui convient pour donner au béton la résistance exigée. Il est bien entendu que la valeur de $\frac{C}{E}$ à adopter pratiquement doit tenir compte d'un coefficient de sécurité imposé par les imperfections du dosage et par celles de l'exécution du béton sur chantier.

Nos essais comparatifs entre le laboratoire et le chantier sont encore insuffisants pour que nous puissions donner des précisions sur la valeur de ce coefficient. Il est certain qu'elle est très variable et qu'en dehors de l'influence de la température, elle dépend surtout des soins apportés à la réalisation du dosage constant en sable ou poussier et en eau.

Si l'on désire faire emploi d'un ciment de qualité différente ou si l'on désire connaître les résistances du béton à un autre âge, les mêmes essais doivent être recommencés en vue de déterminer les nouvelles valeurs de K et K' .

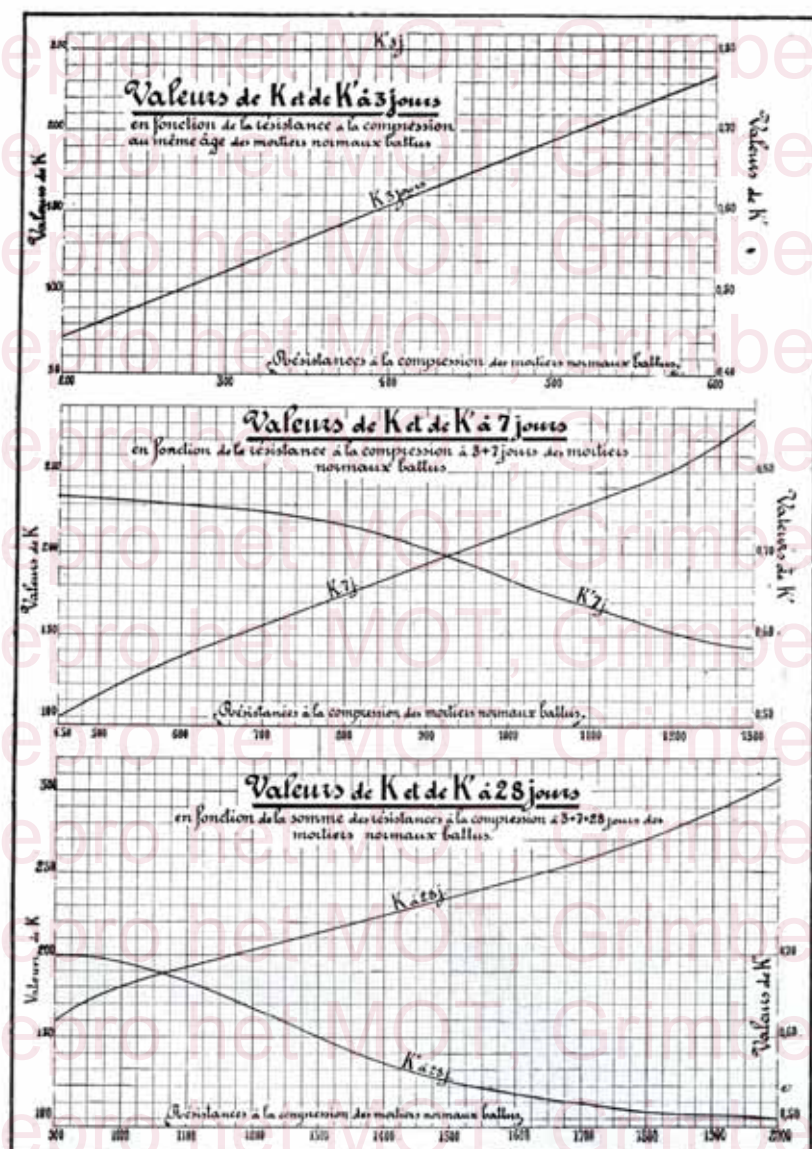


DIAGRAMME XXII.

Pour réduire ces essais, que l'on n'a pas souvent le temps d'entreprendre sur chantier, on peut déterminer les valeurs de K et K' en partant des

résultats des essais de réception des ciments et, parmi ceux-ci, des résistances à la compression des mortiers normaux battus à 3 jours, 7 jours et à 28 jours. Ces valeurs sont données au diagramme XXII; elles supposent que les bétons durcissent dans de bonnes conditions et à des températures voisines de $+15^{\circ}$ à $+20^{\circ}$ C.

Connaissant K , K' et $\frac{C}{E}$ la formule (5) permet de calculer la valeur de la résistance Z du béton à un âge déterminé.

Tous nos résultats expérimentaux obtenus en partant de ces données ont été vérifiés à ± 15 à ± 20 % près, pour des valeurs de $\frac{C}{E}$ restant comprises entre

$$1,30 \leq \frac{C}{E} \leq 2,50$$

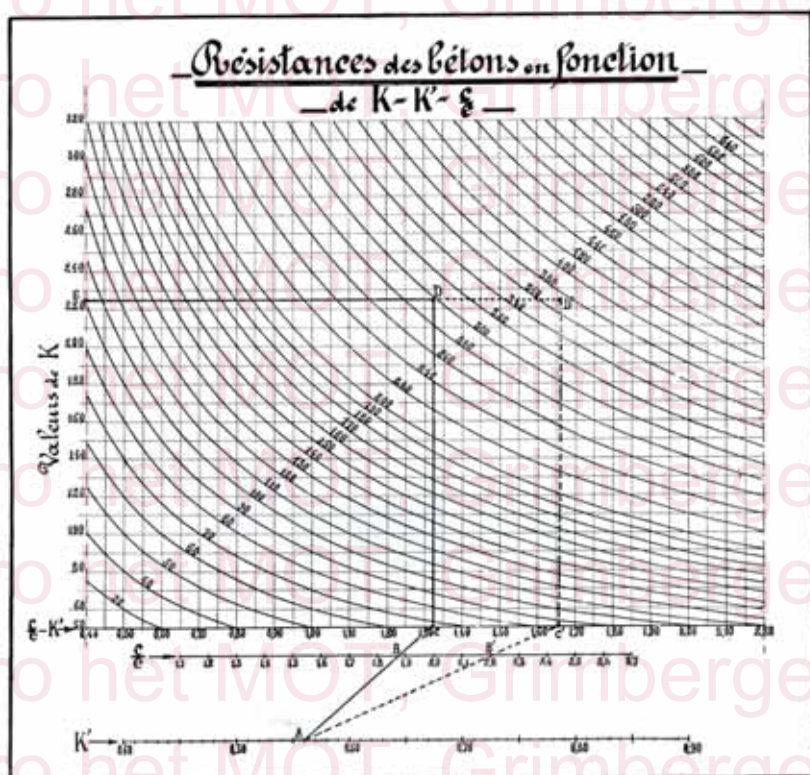


DIAGRAMME XXIII.

Cette détermination de la valeur de Z peut s'effectuer plus simplement à l'aide de l'abaque n° XXIII.

Nous donnons une application de ces abaques au n° 61 suivant.

Nous croyons utile de répéter que les indications ainsi obtenues ne servent que de guide, que pratiquement, elles doivent tenir compte des écarts probables de chantier et qu'en tout cas elles demandent un contrôle sur chantier.

Si ce dernier ne donne pas satisfaction soit par excès, soit par défaut de résistance, il ne sera pas difficile de modifier en conséquence la valeur de

$\frac{C}{E}$ en s'appuyant sur l'abaque n° XXIII et d'arriver ainsi au dosage convenable sans se livrer à de longs tâtonnements.

61. — EXEMPLES DU CALCUL DES RÉSISTANCES DES BÉTONS.

1^{re} Ex.: Admettons qu'il s'agisse de déterminer la résistance à la compression à 28 jours du béton défini au n° 56, 2^e Ex. :

Plaquettes 5/20, grenaille 2/5, sable très fin et 350 kgs de ciment par m³.

Pour ce béton damé à la main, on a trouvé $\frac{C}{E} = 1,72$.

Supposons que l'on fasse usage d'un ciment de *qualité normale* donnant les résistances suivantes à la compression sur mortiers normaux battus.

3 jours	7 jours	28 jours	Somme des résistances
180 kgs/cm ²	295 kgs/cm ²	440 kgs/cm ²	915 kgs/cm ²

A la résistance totale de 915 kgs/cm² correspondent les valeurs de $K = 165$ et de $K' = 0,70$.

On en déduit :

$$Z_{28j.} = 165 (1,72 - 0,70) = 168 \text{ kgs/cm}^2.$$

Si le ciment employé était à *durcissement rapide* et avait donné les résistances suivantes :

3 jours	7 jours	28 jours	Somme des résistances
440 kgs/cm ²	550 kgs/cm ²	630 kgs/cm ²	1920 kgs/cm ²

A cette résistance totale correspondent les valeurs de $K = 280$ et de $K' = 0,52$.

$$\text{d'où } Z = 280 (1,72 - 0,32) = 355 \text{ kgs/cm}^2.$$

Déjà à 7 jours l'emploi de ce ciment P. A. D. R. aurait donné une résistance de

$$Z_{7j.} = 222 (1,72 - 0,67) = 233 \text{ kgs/cm}^2,$$

correspondant, pour la somme des résistances en mortier battu à 3 jours et à 7 jours égale à $440 + 550 = 990 \text{ kgs/cm}^2$, à des valeurs de K et K' respectivement égales à 222 et à 0,67.

Enfin à 3 jours, on aurait obtenu de la même manière

$$Z_{3j.} = 170 (1,72 - 0,80) = 156 \text{ kgs/cm}^2,$$

soit sensiblement la même résistance qu'après 28 jours avec le ciment normal.

Cet exemple montre toute l'importance qu'il faut attacher à la qualité du ciment employé et l'intérêt et l'économie qu'il peut y avoir à utiliser les ciments à haute résistance ou à durcissement rapide quand on désire obtenir de hautes résistances finales ou atteindre en un délai très court la résistance désirée.

2° Ex.: Supposons qu'il s'agisse de déterminer la résistance à 28 jours du béton, dont nous avons déjà fixé la composition dans un exemple précédent traité au n° 57 et en nous servant du graphique n° XV.

La composition de ce béton est : 895 l. 5/20 — 415 l. sable du Rhin et 350 kgs de ciment et $\frac{C}{E} = 1,87$.

Supposons que le ciment à haute résistance dont on désire faire usage ait donné aux essais les résistances suivantes à la compression des mortiers normaux battus :

	3 jours	7 jours	28 jours	Total
R	350 kgs/cm ²	475 kgs/cm ²	600 kgs/cm ²	1.425 kgs/cm ²

A la somme $R_{3j.} + R_{7j.} + R_{28j.} = 1.425$ correspondent sur le diagramme des valeurs de K et de K' respectivement égales à 225 et 0,56.

Déterminons la résistance de ce béton en nous servant de l'abaque n° XXIII.

Joignant par une droite sur cet abaque, le point A correspondant à $K' = 0,56$ au point B, c'est-à-dire à $\frac{C}{E} = 1,87$ on obtient en C la différence $\left(\frac{C}{E} - K'\right)$

Le point de rencontre D de la verticale C D et de l'horizontale tracée à partir de E pour $K = 225$, indique la valeur probable de la résistance de ce béton au laboratoire, soit 300 kgs/cm².

Supposons que, pratiquement sur chantier, la résistance obtenue ne soit que 240 kgs/cm² soit 80 % de celle qui a été évaluée.

Si l'on désire obtenir effectivement la résistance de 300 kgs/cm² à 28 jours sur chantier, la composition du béton doit être modifiée et on peut procéder de la façon suivante :

Admettons que, toutes choses égales, la résistance du nouveau béton atteindra encore approximativement 80 % de la résistance calculée, dans ces conditions, celle-ci devra être de $\frac{300}{0,80} = 375 \text{ kgs/cm}^2$.

Sur le graphique XXIII, nous trouvons cette résistance en D', ce qui correspond à une valeur $\frac{C}{E}$ de 2,20 lue en B' sur la droite joignant A et C'.

Enfin, pour cette valeur de $\frac{C}{E}$ et pour la même fluidité du béton 1,7 le point B' du graphique XV définit la nouvelle composition du béton; 890 l. 5/20, 370 l. sable du Rhin et 430 kgs du même ciment.

62. — Remarques.

Les exemples traités aux n^{os} 57 et 61 montrent les services que peuvent rendre l'utilisation des renseignements groupés dans ce chapitre pour seconder l'entrepreneur ou l'ingénieur dans le choix de la granulométrie, de la richesse en ciment, de la quantité d'eau pour obtenir un béton de plasticité et de résistance déterminées.

D'autre part, pour que ce béton réponde pratiquement à ce que l'on en attend, il convient de veiller à l'observation stricte de son dosage, de sa fluidité et de sa mise en œuvre sur chantier.

Enfin, c'est par le prélèvement fréquent du béton fabriqué sur les travaux que l'on s'assurera de la régularité de sa qualité et de sa résistance, ou que l'on sera averti des troubles apportés à sa qualité et à son durcissement par suite des circonstances diverses et notamment par l'effet des températures basses et du gel (n^{os} 72 et 73).

CHAPITRE V.

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.

I. — DOSAGE

63. — L'exécution du dosage en volume pour le sable, la pierraille et l'eau, en poids pour le ciment a été traitée aux n^{os} 43 et suivants. Dans les chantiers importants les matières inertes sont mises en silos et débitées par des trémies permettant soit un remplissage facile des capacités de mesure, wagonnets ou camions à compartiments, soit un écoulement facile et régulier sur courroies transporteuses. Rappelons que le dosage en volume des sables ou poussières doit subir des corrections très importantes suivant le degré de tassement du matériau et surtout suivant *son degré d'humidité* (n^o 45). Pour éviter ces causes d'erreur, le dosage en poids des matières inertes tend à se répandre. Il existe déjà aux Etats-Unis des appareils de chantier de divers types permettant d'effectuer les dosages en poids.

II. — FABRICATION DES MORTIERS ET DES BÉTONS

64. — 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 pour obtenir une homogénéité parfaite, car c'est dans cet état de siccité que les constituants sont amenés le plus aisément à l'intimité nécessaire.

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

FABRICATION A BRAS

65. — 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 pierreaille.



Fig. 38. — Plate-forme pour la fabrication du béton.

Le procédé de la couronne convient spécialement pour les mortiers, 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.

La quantité d'eau est déterminée par un essai préalable et en tenant compte des indications données à ce sujet (n^{os} 55 et 57), de façon à amener mortiers ou bétons à l'état de plasticité désirée. 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.

La quantité d'eau doit être strictement réglée et surveillée au cours de la fabrication.

La meilleure façon d'exercer cette surveillance est de contrôler la plasticité du béton par la mesure de sa fluidité à l'aide d'un des appareils décrits au n° 42.

FABRICATION MÉCANIQUE

66. — 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 devrait toujours s'effectuer également 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 un premier 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. Nous ne ferons pas ici la description des nombreux types de bétonnières qui sont en usage; mais nous tenons à la disposition de ceux que cela intéresse la documentation que notre Groupement possède à ce sujet.

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 énergique 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 en dessous de une minute et demie, dont une demi-minute de mélange à sec.

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



Fig. 39. — Bétonnière en service sur un chantier de route en béton.

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

La quantité d'eau de gâchage doit également être contrôlée, en vue de conserver au béton la consistance désirée, en ayant recours aux appareils et procédés décrits au n° 42.

III. — DISTRIBUTION ET MISE EN PLACE DU BÉTON

DÉLAI DE PLACEMENT ET DISTRIBUTION DU BÉTON

67. — Les mortiers et les bétons doivent être mis en place avant le commencement de la prise. Aussi y a-t-il toujours intérêt à les utiliser aussitôt après fabrication et d'autant plus vite que le ciment est à prise plus rapide, que la richesse en ciment est plus grande, que la quantité d'eau de gâchage est plus faible et que la température est plus élevée (n° 5 et 6).

D'autre part, plus long est le temps pendant lequel le béton ou le mortier séjourne sur chantier avant d'être employé, plus il perd rapidement sa plasticité et sa facilité de mise en œuvre, ce qui rend plus difficile et plus coûteux son placement dans le coffrage. On est alors tenté de lui additionner de l'eau pour lui rendre sa plasticité première, ce qui réduit fortement sa résistance.



Fig. 40. — Distribution du béton par monte-charges et courroie transporteuse.

Il faut, en tous cas, proscrire le regâchage des mortiers et des bétons dont la prise est nettement commencée, car le phénomène de prise serait contrarié et les cristallisations commencées seraient détruites.

Néanmoins, il existe entre le moment de la fabrication et celui de la mise en place un certain laps de temps suffisant pour permettre le transport ou la distribution du béton du lieu de fabrication aux coffrages.

La seule condition à remplir est d'éviter, au cours du transport, la séparation des matériaux par ordre de grosseur et de densité; si la chose ne

peut être évitée, on installera à pied d'œuvre un chantier relai de malaxage rapide du béton avant sa mise en place.

Les moyens utilisés pour conduire le béton de la bétonnière au lieu d'emploi dépendent de l'importance du chantier, de la distance à parcourir et de la plasticité ou fluidité du béton. On emploiera, suivant le cas, la brouette, le wagonnet, le monte-charge, la courroie transporteuse (fig. 40), la goulotte avec chute du béton par gravité (fig. 46 et 47), la canalisation à l'air comprimé (fig. 41) ou avec propulsion par pompe (fig. 42 et 43), etc.

La plasticité du béton est un facteur important à considérer dans le choix des moyens de distribution, ainsi que nous le verrons ci-après.



Fig. 41. — Distribution du béton par l'air comprimé.

Disons toutefois que, de même qu'il existe dans les centres importants des installations centrales de fabrication de mortiers pour maçonnerie fournissant et transportant le mortier aux divers chantiers, il y a tendance, du moins aux Etats-Unis, à voir se constituer également des installations centrales de fabrication de bétons.

Ces bétons sont transportés dans des camions et, pour éviter la séparation des matériaux, ils continuent à être malaxés au cours du transport par un dispositif maintenant leur masse en mouvement, lors de la marche du véhicule.

Dans un chantier central, les dosages peuvent être parfaitement surveillés et être maintenus réguliers. C'est là un avantage important en faveur des centrales de fabrication du béton.

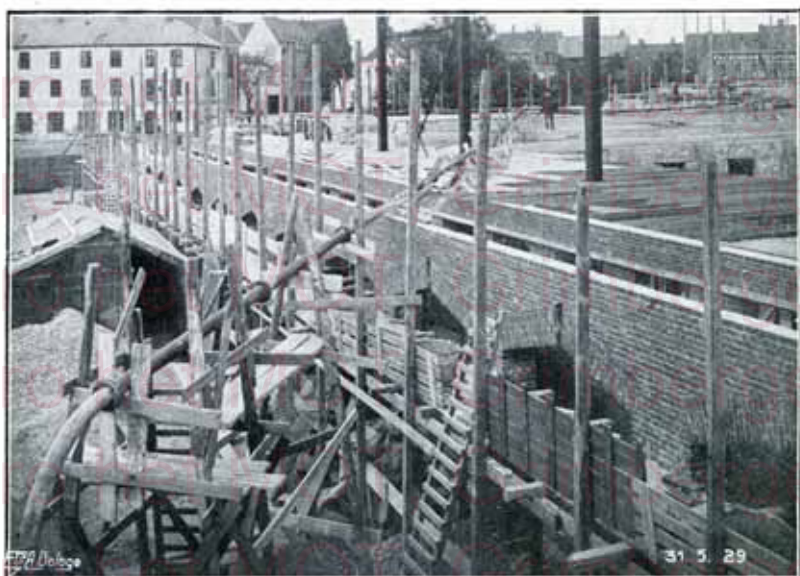


Fig. 42. — Mise en place du béton par pompe foulante.



Fig. 43. — Mise en place du béton par pompe foulante. — Arrivée du béton en place.

MISE EN PLACE ET DAMAGE DU BÉTON

68. Les éléments du béton doivent être serrés les uns contre les autres, afin de constituer une masse aussi compacte et résistante que possible. Les moyens de damage ou de serrage dépendent de la consistance du béton.

On peut avoir recours au damage à la main. Celui-ci s'effectue à l'aide de dames carrées, plates ou effilées suivant les dimensions et la disposition des surfaces à damer et des armatures du béton. Lorsque le béton est suffisamment fluide, il suffit de le régaler et de le piquer avec une tige métallique ou une dame effilée, afin de l'aider à se répartir et à se tasser dans le coffrage.

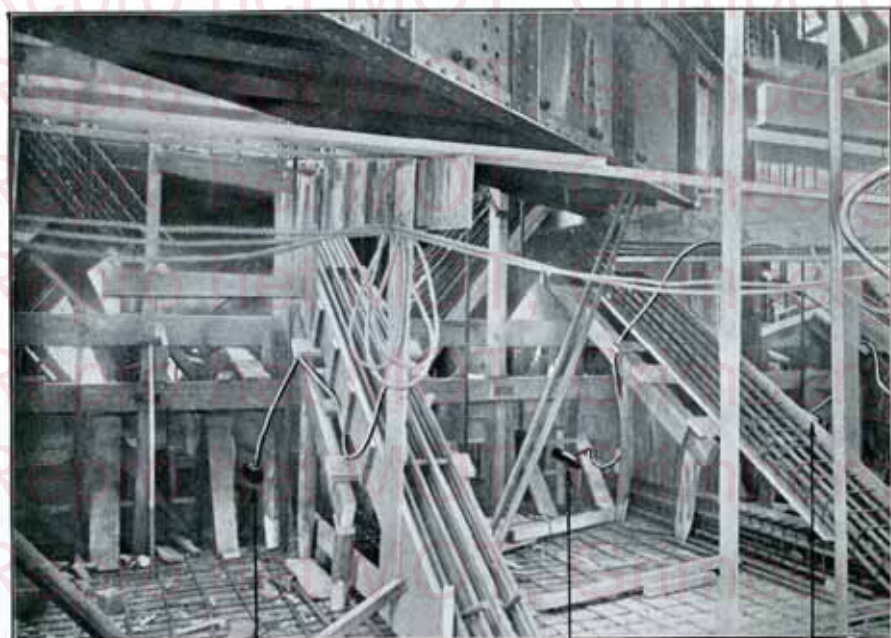


Fig. 44. — Vibrateur en action pour le serrage du béton dans les coffrages.
Entreprise Lécluse et Aillet. - Station du métropolitain. - C. P. O. A. C.

Le damage à l'air comprimé est très employé dans certains travaux. On se sert de pilettes pneumatiques de façon à produire mécaniquement le tassement du béton de la même manière que par le damage manuel.

Ces pilettes peuvent agir de deux façons, soit que leur face inférieure reste en contact avec le béton et reçoive les chocs du marteau pilonneur, soit que leur face inférieure fasse corps avec le marteau et donne elle-même les coups de pilon au béton. Le premier système est préférable, car il provoque

un meilleur tassement du béton en maintenant bien en place les éléments de ce dernier.

De nouveaux procédés ont déjà été utilisés pour provoquer le serrage du béton par « vibrations » au moyen de l'air comprimé.

Ces vibrations, très rapides et d'amplitude très réduite, font vibrer la masse du béton et font pénétrer les éléments de ce dernier à travers les armatures en provoquant un tassement et un serrage des matériaux favorables à la compacité. Sous cette action, les bétons, même simplement plastiques, acquièrent des propriétés semblables à celle des liquides et s'insinuent partout.

Ces vibrations peuvent être imprimées au coffrage (fig. 44) ou aux armatures lorsque le réseau de celles-ci est dense.



Fig. 45. — Tassement du béton par vibrations en surface. — Appareil Vibropil.

On peut également faire agir un appareil vibreur en surface du béton, c'est le principe du procédé Vibropil (fig. 45).

Enfin, on peut même provoquer les vibrations au cœur même de certaines pièces de béton assez massives, en y noyant de petits flotteurs ou des espèces de peignes métalliques, auxquels on imprime les trépidations des vibrateurs.

MORTIERS ET BÉTONS DE CONSISTANCES RAIDE A PLASTIQUE

69. — Ils sont transportables par brouettes, wagonnets, camions, courroies transporteuses.

Ils exigent un damage énergétique 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 sables 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.

Ces bétons contiennent 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, à la pilette pneumatique n° 68.

Il doit être tel qu'il enchâsse parfaitement tous les matériaux.

On le considère comme terminé, lorsque le mortier et une mince pellicule d'eau refluent uniformément à la surface.

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 % et même 50 %. 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 raide et si 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 CONSISTANCES SEMI-FLUIDE A FLUIDE

70. — En dehors des moyens ordinaires de transport de ces bétons, s'ils sont assez fluides, on peut conduire ces mortiers ou bétons à l'endroit où ils doivent être déversés dans le coffrage à l'aide de conduites métalliques où ils reçoivent leur mouvement de propulsion soit à l'aide de l'air comprimé (fig. 41) soit à l'aide d'une pompe foulante (fig. 42 et 43). Ces bétons demandent encore à être mis en place par couches successives. Ces couches seront légèrement damées ou simplement « piquées », suivant le degré de fluidité du béton, pour obtenir une bonne répartition dans les formes et un bon serrage. Ce travail est considéré comme terminé dès que le mortier et l'eau refluent à la surface en une couche suffisamment épaisse. Les procédés de serrage par « vibration » (fig. 44) conviennent particulièrement bien pour des bétons de cette consistance.

MORTIERS ET BÉTONS DE CONSISTANCE FLUIDE (OU COULÉS)

71. — 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 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 due à leur propre poids.

Ces bétons fluides sont généralement transportés par gravité depuis la bétonnière jusqu'au coffrage. On utilise des wagonnets à benne ou des monte-charges élevant le béton à la hauteur voulue pour le déversement 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. Lorsque la chose est possible, il convient de ne pas laisser tomber le béton des goulottes d'une hauteur supérieure à 1 m. ou 1 m. 50.

La composition granulométrique des mélanges doit être telle que le béton garde son homogénéité au cours de ces transports et déplacements. S'il



Fig. 46. — Béton coulé. — Elévation du béton par monte-charges et déversement par goulotte.

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. On peut également recevoir le béton dans de petites trémies-réservoirs, qui le distribuent aux 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.

Le béton coulé fait gagner du temps et de la main-d'œuvre; il supprime les graves dangers d'un damage mal exécuté, mais la grande quantité d'eau



Fig. 47. — Béton coulé. Dispositif analogue à celui de la figure précédente.

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° 58).

IV. — CONDITIONS DE DURCISSEMENT

TEMPÉRATURES BASSES MAIS SUPÉRIEURES A 0°

72. — L'entrepreneur ne doit pas seulement être mis en garde contre les dangers de la gelée, mais il doit également avoir l'attention attirée sur le *ralentissement du durcissement des bétons* à des températures supérieures à 0° et allant jusqu'à + 7 à + 8°.

De telles températures n'amènent évidemment aucune perturbation dans la résistance finale des bétons, mais réduisent, notablement et d'autant plus qu'elles sont voisines de zéro, la résistance des bétons au début de leur durcissement, c'est-à-dire dans la période qui correspond aux délais habituels de décoffrage. C'est là que réside sur chantier le danger de l'influence saison-

nière. Le délai de décoffrage a été établi et pratiqué pendant la bonne saison et l'entrepreneur croit être suffisamment prudent en gardant ces délais pour toute l'exécution des travaux, même lorsque celle-ci se prolonge jusqu'en hiver, du moment qu'il ne gèle pas. Il n'en est rien; le délai de décoffrage doit être augmenté lorsque la température reste en dessous de $+7^{\circ}$ à $+8^{\circ}$ et il doit l'être d'autant plus que le délai précédemment admis était plus court.

La meilleure façon de se rendre compte du délai qui convient dans ces conditions est de procéder à des essais d'écrasement de cubes de béton qui ont durci sur chantier et qui renseigneront exactement sur la valeur exacte du béton, à un moment donné.

Rappelons que les résistances calculées par les indications des n^{os} 59 à 62 s'entendent pour des températures d'au moins $+15^{\circ}$ C.

GELÉE

73. — La façon dont le béton se comporte à la gelée a déjà été longuement étudiée par divers laboratoires. Nous croyons utile de résumer ci-après les conclusions qui se dégagent de ces recherches en ce qui concerne le durcissement des bétons, conclusions qui peuvent être appliquées aux travaux sur chantier.

1^o Il faut absolument empêcher le béton de geler avant sa prise. Mais il n'est pas suffisant de protéger le béton contre la gelée uniquement jusqu'au moment où il atteint sa fin de prise, car la congélation du béton aux premiers âges occasionne toujours à celui-ci un dommage permanent, conséquence d'un durcissement extrêmement ralenti;

2^o Pour éviter toute perte de résistance finale, il est donc nécessaire de donner au béton une période de durcissement initial à une température convenable avant de l'exposer à la gelée. La protection contre la gelée doit être d'au moins une semaine, si le béton durcit à une température normale d'au moins 15° C. Elle devrait être portée à 2 semaines au moins, si la température de durcissement n'est que de quelques degrés au-dessous de zéro ;

3^o Dans l'estimation de la résistance du béton et dans l'évaluation du délai de décoffrage, il faut décompter de la durée du durcissement la période pendant laquelle le béton a été soumis au gel sans protection.

Quelles sont, dans ces conditions, les règles à suivre pour l'exécution des travaux par temps de gelée ?

Jusqu'à une température de 0° et par menace de gel, les bétonnages peuvent généralement être exécutés comme d'habitude (n^{os} 6 et 9), du fait que les matériaux et notamment l'eau de gâchage sont à une température telle

que le béton prend au gâchage une température supérieure à 0°. La chaleur dégagée au cours de la prise protège encore le béton contre l'action des faibles gelées.

Cependant, si l'on désire garder aux bétons une rapidité de prise et de durcissement suffisante, il convient d'avoir recours aux moyens suivants :

— Augmentation de la richesse en ciment, si le mortier ou le béton est assez pauvre en ciment.

— Utilisation d'un ciment à durcissement rapide (P. A. D. R.).

— Réduction de la quantité d'eau de gâchage.

— Protection contre le froid des travaux exécutés.

Si l'on désire poursuivre les travaux de bétonnage par la gelée et jusqu'à des températures plus basses allant jusqu'à — 10° C., il convient de prendre les mesures suivantes :

1) On évitera la congélation de l'eau de gâchage en lui additionnant l'un des sels suivants :

— Du sel marin, 5 à 8 % 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 et il accroît le retrait du béton.

— Du chlorure de calcium. L'emploi de ce sel est à recommander pour activer le durcissement. Toutefois, il augmente fortement le retrait du béton.

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 % 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.

2) On prendra des dispositions permettant le réchauffement des matériaux, de l'eau de gâchage et du béton au cours des premiers jours de durcissement.

Le réchauffement des matériaux s'effectue à la vapeur à l'aide de tuyaux enfouis dans les tas d'approvisionnements branchés sur une chaudière de chantier. Pour élever la température du béton frais de 1°, il faut élever celle de l'eau de 3°5 C. environ.

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 et 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 (fig. 48). Dans ce cas, les bâches laisseront un espace libre le long des piliers et murs bétonnés de façon à y permettre une circulation d'air chaud. Les dallages doivent être chauffés autant par leur face supérieure que par leur face inférieure. On y parvient en installant au-dessus d'eux, à 0 m. 15 environ un plancher continu maintenant l'air chaud. Celui-ci y accède par de petites

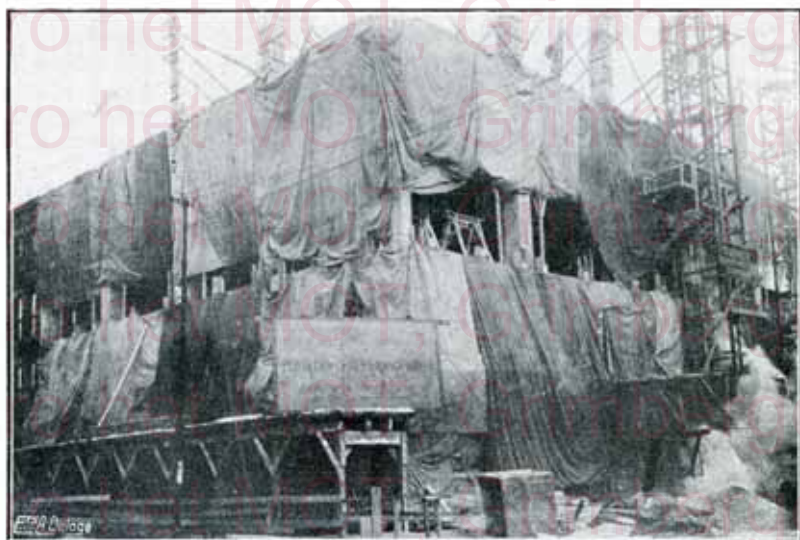


Fig. 48. — Type d'installations permettant l'exécution des bétons par gelée.

ouvertures (qu'on bouche par la suite), ménagées tous les 30 mètres carrés de dallage; un brasero est utilisé sous le dallage pour une même surface. On vise à obtenir au voisinage des bétons une température de $+15^{\circ}$ à $+20^{\circ}$.

Avant bétonnage, on doit enlever la neige des coffrages et déglacer ceux-ci à la vapeur et ce seulement après installation des braseros, pour éviter que l'eau condensée ne gèle à nouveau.

*
* *

A la suite d'essais tout récents sur la tenue des bétons à la gelée (1), M. MAGNEL tire les conclusions précises suivantes :

« Nous conseillons donc :

» 1^o Lorsque la gelée n'existe pas pendant le bétonnage, mais est pos-

(1) « Peut-on bétonner quand il gèle » par G. Magnel, « Technique des Travaux », no 2, Février 1930.

» sible endéans les 24 heures qui suivent, de mélanger 4 % de CaCl^2 à l'eau
 » de gâchage si l'on bétonne en ciment normal (P. A. N.) ; cette précaution
 » n'est pas nécessaire avec le ciment à durcissement rapide (P. A. D. R.) ;
 » 2° Lorsqu'on bétonne pendant qu'il gèle, d'employer du P. A. D. R.
 » et 4 % de CaCl^2 dans l'eau de gâchage. Dans ces conditions, on peut
 » continuer à bétonner sans danger jusqu'à -6°C. , même si la température
 » minima pendant les premières 48 heures suivant le bétonnage descend jus-
 » qu'à -11°C. ;
 » 3° Quand on veut bétonner alors que la température est en dessous
 » de -6° , il faut employer 4 % de CaCl^2 et, en même temps, chauffer les
 » matériaux et le béton mis en place.
 » *Remarque.* — Comme on n'est jamais certain de ne pas voir se pro-
 » duire brusquement des températures plus défavorables que celles considérées
 » ici, nous conseillons, par mesure de prudence, lorsqu'on bétonne en hiver,
 » alors qu'il y a danger de gelée, de prélever de nombreux cubes de béton
 » qu'on conserve sur chantier dans les mêmes conditions que le béton de la
 » construction même. En cas de doute quant à l'effet de la gelée, on sou-
 » mettra ces cubes à l'essai de compression et on sera fixé sur la valeur du
 » béton et sur les possibilités de décoffrage. »

REMARQUES DIVERSES

74. — Les pluies et notamment les pluies d'orage, même si elles sont
 de courte durée, réduisent la résistance du béton, lorsque l'arrosage se produit
 sur du béton frais n'ayant pas encore commencé sa prise. Sur des surfaces
 horizontales, l'action de la pluie est évidemment plus prononcée.

L'action du soleil et de la chaleur, même de courte durée, accélère au
 contraire le durcissement et accroît les résistances. Toutefois, il y a lieu de
 craindre une dessiccation trop rapide du béton.

En conséquence, il est donc recommandé de toujours couvrir le béton
 après son placement pour le protéger aussi bien contre la gelée que contre
 le soleil ou la pluie, cette règle s'impose surtout pour les terrasses et tous les
 revêtements sensiblement horizontaux.

V. — RETRAIT. — FISSURATION

75. — 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.



Fig. 49. — Route en béton exécutée par dalles successives.

Humidifier pendant un temps suffisamment long est la seule règle 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 une à quatre semaines, suivant la rapidité du durcissement du ciment. Le mortier ou le béton acquiert ainsi une résistance suffisante pour supporter sans se fissurer les efforts provoqués par le retrait ultérieur.

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 couches minces fortement battues à la taloche. Chaque couche est appliquée sur la précédente dès que celle-ci est suffisamment résistante pour supporter le travail de la couche suivante.

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 souvent 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 longueur. (Fig. 49).

Mais des résultats tout aussi favorables peuvent être obtenus par une exécution continue du revêtement pourvu que des joints de dilatation et de retrait y soient ménagés tous les 8 à 10 mètres (1).

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 dilatactions 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 (nos 13, 14, 15, 16).

Pour les ouvrages dans lesquels le fendillement et les fissurations sont surtout à craindre en surface, il convient en outre 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.

VI. — MORTIERS ET BÉTONS A LA MER

76. — 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 % de trass par rapport au poids du ciment.

(1) Voir notre brochure n° 11. — Exécution de la route et de la rue en béton.

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 précautions 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.

77. — 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° 45).

I. — MORTIERS.

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.											
a) pour construc- tions peu impor- tantes.	300	—	1000	—	—	295	—	982	—	—	Ce mortier peut convenir pour 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 pré- férable de faire usage de pous- sier. Le sable fin est employé à défaut d'autre sa- ble.
	300	—	—	1000	—	300	—	—	1000	—	
	300	—	—	—	1000	300	—	—	—	1000	
b) pour ouvrages d'art : voûtes, piles, culées, murs de soutè- nement, fonda- tions de machi- nes.	450	—	1000	—	—	422	—	936	—	—	Bonnes résistances aux efforts mé- caniques et aux intempéries. Im- perméabilité suf- fisante dans bien des cas. Sable fin employé à défaut d'autre sable.
	450	—	—	1000	—	413	—	—	918	—	
	450	—	—	—	1000	425	—	—	—	945	
c) pour ouvrages demandant une très bonne impermeabilité.	600	—	1000	—	—	528	—	880	—	—	Mortiers donnant de grandes résis- tances en même temps qu'une grande imper- méabilité.
	600	—	—	1000	—	515	—	—	858	—	
	600	—	—	—	1000	535	—	—	—	892	
II. — Mortier pour enduits.											
a) Rejointoiement, chape de voûte, etc.	700	—	1000	—	—	600	—	856	—	—	Très grande im- perméabilité. Assure l'étan- chéité. L'exé- cution de ces en- duits doit être effectuée avec beaucoup de soin en vue d'éviter leur fissuration.
	700	—	—	1000	—	580	—	—	828	—	
	700	—	—	—	1000	600	—	—	—	856	
b) Enduit de pare- ment, de résér- voirs d'eau.	900	—	1000	—	—	713	—	793	—	—	
	900	—	—	1000	—	670	—	—	743	—	
	900	—	—	—	1000	716	—	—	—	795	

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° 45).

USAGE DU MORTIER	Dosages (1)					Quantités entrant dans un mètre cube de mortier frais (1)					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. - Revêtements d'usure :											Ces revêtements sont générale- ment exécutés av. de la grenaille 2/5 m/m de por- phyre, de quart- zite ou de grès dur. Pour des revête- ments ou des dalles dont l'épaisseur est supérieure à 5 cm. on peut utiliser de la grenaille 2/8 à 2/10 milli- mètres.
Couche supérieure servant de pave- ment pour ateli- ers, écuries, étables, granges, garages, etc.	600	800	350	—	—	570	760	332	—	—	
Briques ou dalles de pavement exécutées à la main.	600	750	—	400	—	538	672	—	359	—	
	600	950	—	—	250	557	882	—	—	232	
II. — Poteaux et panneaux de clôture en mortier de ci- ment, bacs, man- geoirs, etc.	475	800	400	—	—	450	757	379	—	—	Lorsque la plus petite 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 rigo- les, bordures de jardin, récipients non étanches, etc.	350	800	500	—	—	326	745	465	—	—	Si l'épaisseur 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
 Poussier de porphyre 0/2 m/m id. 145 id. id.
 Sable du Rhin 0/2 m/m id. 150 id. id.
 Sable très fin 0/0,35 m/m id. 135 id. id.

mesures faites sans tassement sur matériaux secs.

III. — BÉTONS DE PIERRAILLES CONCASSÉES (composition B)

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° 45).

Béton 0/40 millimètres

USAGE DU BÉTON	DOSAGE (1)						QUANTITÉS DE MATIÈRES par mètre cube de béton frais (1)						Observations	
	Ciment % du poids total des matières Kg.	Pierraille en litres		Sables ou poussiérs secs en litres			Ciment Kg.	Pierraille en litre :		Sables ou poussiérs secs en litres				
		20/40	5/20	Grenaille 2/5	Sable ou poussier 0/2 à 0/3	Sable fin		20/40	5/20	Grenaille 2/5	Sable ou poussier 0/2 à 0/3	Sable fin		
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.	—	
			410	350	195	—	165	382	517	452	246	—	213	
Fondations mas- sives et impor- tantes p ^r ma- chines.	14,5	300	470	470	—	340	—	325	503	498	—	366 p.	—	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.
								330	520	517	—	372 s.	—	
			470	400	225	—	225	329	518	437	243	—	243	
Couche infé- rieure pour routes.	13,5	300	510	500	—	375	—	303	513	510	—	380 p.	—	Pour les revê- tements d'u- sure, le pou- srier de por- phyre ou de toute autre roche très dure est pré- férable au sable fin.
								310	525	521	—	389 s.	—	
			510	425	240	—	260	308	518	433	245	—	262	
Fondations mas- sives peu im- portantes et peu soumises à vibrations.	11,75	300	585	575	—	460	—	264	514	506	—	405 p.	—	
								267	521	512	—	410 s.	—	
			685	490	270	—	325	265	517	433	239	—	287	
Fondations mas- sives agissant par leur poids et ayant sur- tout un rôle de répartition des efforts.	11	300	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 1 à la page 136.

Bétons 0/25 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.	10/25	—	Grenaille 2/5 Sable ou poussier 0/2 à 0/3	Sable fin	Ciment	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	380 387	767 782	—	300 306	304 p. 310 s.	—	On obtient d'excellents bétons en utilisant comme élé- ments fins un mélange par parties égales de sa- ble de ri- vière et de poussier.
			660	—	310	— 175	388	785	—	397	—	229	
Béton armé ; ouvrages su- jets à vibra- tions, fonda- tions de ma- chines.	14.75	300	700	—	275	310	335 342	783 800	—	306 312	344 p. 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	308 315	780 790	—	300 307	361 p. 370 s.	—	
			750	—	385	— 290	313	793	—	396	—	305	
Fondations, cou- che inférieure p ^r aires béton- nées de locaux, allées, prome- nades, etc.	12	300	860	—	335	425	262 272	750 780	—	293 304	372 p. 385 s.	—	
			860	—	435	— 365	272	780	—	395	—	331	

(1) Pour les poussières, sables et pierrailles, les dosages sont donnés en volume comme cela se pra-
tique 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 % du poids total des matières	Pierraille en litres	Sables ou poussières secs en litres			Ciment Kg.	Pierraille en litres	Sables ou poussières secs en litres					
			Grenaille 2/5	Sable ou poussier 0/2 à 0/3	Sable fin			Grenaille 2/5	Sable ou poussier 0/2 à 0/3	Sable fin			
											Kg.	Kg.	
Revêtement pour trottoirs, allées, couche supérieure p ^r trottoirs ou routes, poteaux, résér- voirs 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 : ou- vrages sujets 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 ^{es} , mass. non soumises à vibrations. Couche infé- rieure p ^r aire bétonnée de lo- caux, trottoirs, allées, 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 138.

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° 45)

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.
	600	825	—	230	575	780	—	220	
Poteaux et pan- neaux de clô- ture.	475	695	400	—	475	695	400	—	Il en est de mê- me pour toute pièce moulée dont l'épais- seur est supé- rieure à 5 cm.
	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 MATÉRIAUX SECS.

Les volumes de sable doivent être corrigés en tenant compte du p. c. d'humidité que les matériaux contiennent (voir n° 45).

USAGE DU BETON	Dosages (1)					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.	litres	litres	litres	lit.	kg.	litres	litres	litres	
BÉTON 0/30 A 0/40 MM.											
I. Revêtements de routes exé- cutés en une couche.	15,9	300	750 5/40	—	240	—	395 985 5/40	—	316	—	La grosseur maxi- mum du gravier est en rapport avec les dimen- sions des pièces à exécuter. Elle peut être su- périeure à 40 m/m, mais les proportions des diverses gros- seurs doivent être modifiées en les détermin- nant à l'aide d'une des com- positions type A, B ou C, que l'on désire réali- ser.
		300	700 5/40	165	—	140	398 925 5/40	220	—	185	
		300	800 5/40	—	—	200	390 10335/40	—	—	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 infé- rieure pour routes.	11,5	300	10505/30	—	450	—	270 945 5/30	—	404	—	
		300	960 5/30	285	—	300	265 847 5/30	250	—	265	
		300	11255/30	—	—	415	256 957 5/30	—	—	357	
BETON 0/25 A 0/20 MM.											
I. Revêtements pour trottoirs, allées, couche supérieure p ^r routes, poteaux réservoirs, pla- te-formes de toitures, etc.	17	300	660 5/25	—	260	—	405 880 5/25	—	350	—	Pour les revête- ments d'usage 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	
		300	690 5/20	—	—	250	400 920 5/20	—	—	333	
II. Béton armé. Fondation de machines.	14,75	300	800 5/20	—	335	—	337 895 5/20	—	375	—	
		300	685 5/20	265	—	230	330 755 5/20	292	—	253	
		300	860 5/20	—	—	345	320 915 5/20	—	—	368	
III. Fondat. peu importantes, couches infér. p ^r routes, trot- toirs, allées, etc.	12 0/0	300	995 5/20	—	415	—	265 870 5/20	—	366	—	
		300	800 5/20	330	—	330	265 710 5/20	292	—	300	
		300	10205/20	—	—	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	165 kg.	Sable de rivière	150 kg.
Gravier 5/30	155 kg.	Sable fin	135 kg.
Gravillon 2/5	150 kg.		

PREMIÈRE PARTIE

LE CIMENT PORTLAND ARTIFICIEL

1 —	Origine et dénomination	9
-----	-----------------------------------	---

CHAPITRE PREMIER

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

2 —	§ I. Fabrication	10
3 —	§ II. Composition chimique	18
4 —	§ III. Progrès de l'industrie du ciment. — Superciment	19

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 —	§ I. Prise	21
6 —	Causes de variations dans la durée de prise des ciments :	
	a) Quantité d'eau de gâchage	22
	b) Action de la température et notamment de la gelée	23
	c) Influence des sels contenus dans l'eau de gâchage ou additionnés au ciment	24
7 —	§ II. Durcissement et résistances	25
8 —	Résistance des ciments Portland artificiels fabriqués actuellement	28
9 —	Causes de modification dans l'allure du durcissement et dans les résistances :	
	a) Proportion d'eau de gâchage	29
	b) Température. — Gelée	32
	c) Influence des sels contenus dans l'eau de gâchage ou additionnés au ciment	33
10 —	§ III. Stabilité ou non expansion du ciment	33
11 —	Remarques pratiques	34
12 —	Travaux à la mer	34
13 —	§ IV. Variations de volume. — Dilatation. — Contraction. — Gonflement. — Retrait	36
14 —	Gonflement et retrait de durcissement	36
15 —	Variations de volume dues aux alternatives de sécheresse et d'hu- midité	39
16 —	Changements de volume dus aux variations de température	40
17 —	Remarque	41
18 —	§ V. Finesse de mouture	41
19 —	§ VI. Matières d'addition au ciment	43
	Ciment Portland de fer	43
	Ciment Portland de laitier ou ciment de haut fourneau	43
	Ciment de laitier	44

CHAPITRE III

GARANTIE DE QUALITÉ DES CEMENTS PORTLAND ARTIFICIELS SORTANT DES USINES AFFILIÉES AU GROUPEMENT PROFESSIONNEL DES FABRICANTS DE CIMENT PORTLAND ARTIFICIEL DE BELGIQUE

20 —	Contrôle	45
21 —	Spécifications générales officielles	46

DEUXIÈME PARTIE

MORTIERS ET BÉTONS

CHAPITRE I

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

22 —	I. <i>Conservation du ciment</i>	48
23 —	II. <i>Sables :</i>	50
24 —	Nature des sables	51
25 —	Composition granulométrique des sables	53
26 —	Caractéristiques de quelques sables	58
27 —	Qualités d'un sable	60
28 —	Conservation des sables sur chantiers	62
29 —	III. <i>Pierrailles :</i>	62
30 —	Nature et forme de la pierreaille	64
31 —	Composition granulométrique de la pierreaille	67
32 —	Caractéristiques de quelques pierrailles	68
33 —	Qualités d'une bonne pierreaille	68
34 —	Conservation de la pierreaille	68
35 —	IV. <i>Eau de gâchage :</i>	68
36 —	Qualité	68

CHAPITRE II.

DOSAGE DES MORTIERS ET BÉTONS

34 —	I. <i>Principes du dosage</i>	70
35 —	II. <i>Richesse en ciment</i>	70
36 —	III. <i>Composition granulométrique des mortiers et des bétons</i>	71
37 —	IV. <i>Quantité d'eau de gâchage</i>	71
38 —	V. <i>Conclusion</i>	72
39 —	VI. <i>Choix du dosage des mortiers et des bétons</i>	72
40 —	Richesse en ciment	72
41 —	Grosseur maximum des matières inertes :	73
42 —	Pour mortiers	73
43 —	Pour bétons	74
44 —	Quantité d'eau et plasticité	78
45 —	VII. <i>Exécution des dosages sur les chantiers</i>	79
46 —	Dosage du ciment	79
47 —	Dosage des sables	81
48 —	Dosage de la pierreaille	81
49 —	Dosage de l'eau	81

CHAPITRE III.

DÉTERMINATION DE LA COMPOSITION GRANULOMÉTRIQUE DES MORTIERS ET DES BÉTONS ET DE LEUR DOSAGE EN CIMENT ET EN EAU.

48 —	§ I. Diagrammes et tableaux donnant des compositions granulométriques types de bétons A, B et C	82
49 —	§ II. Règles d'emploi des tableaux de compositions granulométriques des bétons	84
	Choix de la composition granulométrique :	
	1) Caractéristiques des compositions A, B et C	84
	2) Poids spécifiques des squelettes	85
	3) Composition suivant la grosseur maximum du squelette	85
	4) Détermination de grosseurs non indiquées aux tableaux	85
	5) Eléments fins	86
50 —	Réalisation pratique des compositions A, B et C	86
51 —	Grosseurs minimum et maximum d'un sable ou d'une pierreaille	90
52 —	Concassage de la pierreaille	90
53 —	Granulométrie déterminée à l'aide de tamis à trous circulaires ou de tamis à mailles carrées	90
54 —	§ III. 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	91
55 —	§ IV. Quantité d'eau à employer pour la fabrication des bétons de compositions A, B et C	92
56 —	§ V. Quelques exemples d'application des règles concernant la réalisation pratique des compositions A, B et C	93
57 —	§ VI. Graphique donnant directement les dosages des bétons pour béton armé	100

CHAPITRE IV

RÉSISTANCE DES BÉTONS

58 —	Détermination de la résistance des bétons	105
59 —	Loi de résistance	106
60 —	Estimation de la résistance des bétons. Valeurs de K et K'	110
61 —	Quelques exemples du calcul des résistances des bétons	113
62 —	Remarques	115

CHAPITRE V

FABRICATION ET MISE EN ŒUVRE DES MORTIERS ET DES BÉTONS

63 —	§ I. Dosage	116
64 —	§ II. Fabrication des mortiers et des bétons	116
65 —	Fabrication à bras	116
66 —	Fabrication mécanique	118
67 —	§ III. Distribution et mise en place du béton	119
68 —	Mise en place et damage du béton	123
69 —	Mortiers et bétons de consistance raide à plastique	124
70 —	Mortiers et bétons de consistance semi-fluide à fluide	125
71 —	Mortiers et bétons de consistance liquide (ou bétons coulés)	125
	§ IV. Conditions de durcissement	127
72 —	Températures basses mais supérieures à 0°	127
73 —	Gelées	128
74 —	Remarques diverses	131
75 —	§ V. Retrait. Fissuration	131
76 —	§ VI. Mortiers et bétons à la mer	133
77 —	Quelques dosages et compositions des mortiers et bétons (Tableaux I à V)	135

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 Groupement 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 Groupement, qui lui fournira, à titre gracieux, toutes indications utiles.