

ANNALES
DES
PONTS ET CHAUSSÉES

MÉMOIRES ET DOCUMENTS

RELATIFS

A L'ART DES CONSTRUCTIONS

ET AU SERVICE DE L'INGÉNIEUR

LOIS, DÉCRETS, ARRÊTÉS ET AUTRES ACTES

CONCERNANT

L'ADMINISTRATION DES PONTS ET CHAUSSÉES

MÉMOIRES ET DOCUMENTS

—
7^e SÉRIE

TOME IV

—
1892

2^e SEMESTRE

PARIS

V^v.^e CH. DUNOD, ÉDITEUR

LIBRAIRE DES CORPS NATIONAUX DES PONTS ET CHAUSSÉES, DES MINES
ET DES TÉLÉGRAPHES

49, Quai des Augustins, 49

ANNALES
DES
PONTS ET CHAUSSÉES

MÉMOIRES ET DOCUMENTS

RELATIFS

A L'ART DES CONSTRUCTIONS

ET AU SERVICE DE L'INGÉNIEUR

N° 21

SUR LA COMPACITÉ

DES MORTIERS HYDRAULIQUES

Par M. FERET, Ancien élève de l'École polytechnique,
Chef du laboratoire des ponts et chaussées de Boulogne-sur-Mer

I. — EXPOSÉ.

État de la question. — Dans une note antérieure parue aux *Annales des Ponts et Chaussées* (mars 1890), nous avons relaté diverses expériences exécutées au laboratoire des Ponts et Chaussées de Boulogne en vue d'étudier les influences (conditions de fabrication et de conservation), qui peuvent modifier la qualité intrinsèque des ciments portland, indépendamment de toute considération relative à la manière dont on les emploie.

Dans le présent mémoire, nous nous proposons au contraire de ne plus nous occuper de la nature du ciment et, nous supposant en possession d'un produit de bonne qualité et toujours identique à lui-même, de rechercher com-

ment varient les propriétés des mortiers fabriqués dans des conditions différentes, notamment quand on modifie la nature et la proportion du sable et la proportion de l'eau entrant dans leur composition.

La question ainsi posée a déjà fait de la part de nombreux ingénieurs ou spécialistes, l'objet de recherches intéressantes qui toutes ont montré combien elle était importante. Pourtant elle est encore loin d'être complètement résolue. Cet insuccès relatif doit être attribué en partie à ce que la plupart des observateurs se sont bornés à étudier des cas particuliers et ont adopté pour leurs recherches des méthodes souvent très différentes, ce qui, joint à la diversité des ciments employés, a rendu à peu près impossible la comparaison des résultats.

Les principales expériences se rattachant à la question des mortiers sont dues à M. l'ingénieur en chef Alexandre, dont le récent travail(*) réunit un ensemble bien homogène d'observations grâce auxquelles leur auteur a pu formuler des conclusions présentant un caractère indéniable de généralité.

Les principales de ces conclusions, que nous citerons parce qu'elles nous paraissent définir parfaitement l'état actuel des connaissances que l'on possède sur la question, sont les suivantes :

La résistance des mortiers fabriqués dans les conditions ordinaires des chantiers augmente avec le dosage de chaux ou de ciment.

Elle augmente en général, surtout au début du durcissement, avec la grosseur du sable.

Les mortiers confectionnés avec un mélange de sables gros et fins présentent presque les mêmes avantages que ceux où le gros sable est exclusivement employé et doivent être préférés à tous égards.

(*) *Annales des Ponts et Chaussées*, 6^e série, XX, p. 277 (septembre 1890).

La porosité des mortiers de ciment varie dans des limites très étendues.

Elle diminue quand le dosage du ciment augmente.

Elle est d'autant plus forte que le sable est plus fin.

La perméabilité diminue également quand le dosage du ciment augmente.

Contrairement à la porosité, elle augmente avec la grosseur du sable.

Les mortiers confectionnés avec un sable mélangé de diverses grosseurs, qui sont relativement peu poreux, sont également peu perméables.

La perméabilité des mortiers soumis à une filtration continue d'eau douce ou d'eau de mer diminue rapidement avec le temps (*).

Pour éviter la décomposition des mortiers par l'eau de mer, on doit veiller à ce que le dosage en ciment ne soit pas trop faible et rejeter les sables fins.

Il est recommandé également de gâcher les mortiers à bonne consistance en employant un dosage d'eau plutôt excessif qu'insuffisant.

Nos expériences, commencées en 1887 et poursuivies depuis lors sans interruption, confirment ces diverses propositions en même temps qu'elles les font apparaître comme les conséquences de lois synthétiques bien définies, grâce auxquelles on peut dès à présent prévoir à peu près ce qui doit se passer dans les divers cas particuliers qui se rencontrent dans la pratique des chantiers.

Principe de la méthode suivie. — La méthode que nous avons suivie est basée sur les considérations suivantes :

(*) Il convient de réserver le cas où surviendraient dans le mortier soumis à la filtration certaines modifications importantes telles qu'un commencement de désagrégation ou des fissures.

La propriété qu'un mortier possède à un moment donné de résister plus ou moins aux diverses forces qui tendent à le disjoindre dépend de plusieurs causes :

La plus importante, conséquence de phénomènes d'ordre chimique, est due au plus ou moins d'énergie que possède l'agglomérant employé, suivant le degré de cohésion de ses molécules entre elles et leur adhérence aux grains de sable qu'il a mission de relier les uns aux autres.

Mais on conçoit aussi que, toutes choses étant égales d'ailleurs en ce qui concerne la qualité de l'agglomérant, l'énergie de ce dernier pourra s'exercer très différemment suivant la répartition et les positions relatives de ses molécules et des grains de sable.

Enfin, il y a lieu de tenir compte d'un troisième facteur constitué par les forces purement mécaniques qui résultent de l'agencement mutuel de toutes les particules solides dont l'ensemble constitue le mortier considéré.

D'autre part, il ne suffit pas qu'un mortier possède à une époque donnée une dureté déterminée. Il faut encore que sa résistance persiste et même, autant que possible, aille en augmentant avec le temps.

Si on laisse de côté les détériorations occasionnées par des forces mécaniques accidentelles supérieures à la résistance du mortier, on est amené à reconnaître que les modifications qu'il est susceptible d'éprouver ne peuvent guère provenir que de changements dans l'état chimique de l'agglomérant, changements qui doivent être divisés en deux catégories suivant les causes qui les déterminent.

D'une part, dès le moment où la chaux ou le ciment ont été mis au contact de l'eau par l'opération du gâchage, il se produit entre les composés chimiques divers dont ils sont constitués un enchaînement inévitable de réactions qui, s'alimentant aux dépens des éléments mêmes du

ciment sans le secours d'aucun agent extérieur, se continuent longtemps encore 'après ce qu'on est convenu d'appeler la prise, sans que les conditions de milieu et d'exposition des mortiers puissent avoir d'autre influence que d'en modifier ou retarder plus ou moins la manifestation. Telle paraît être l'action de certains corps qu'on a quelquefois désignés sous le nom d'*expansifs* et qui, lorsqu'ils se rencontrent dans les ciments, peuvent n'entrer en jeu qu'après plusieurs mois ou même plusieurs années et produire alors de profondes perturbations dans l'équilibre moléculaire des mortiers.

D'autre part, à côté de ces modifications, conséquences nécessaires et exclusives de la nature et de la qualité de l'agglomérant employé, il en est d'autres beaucoup plus nombreuses, que pratiquement il est souvent bien difficile de distinguer des premières, mais qui pourtant en diffèrent essentiellement en ce qu'elles demandent pour se produire l'intervention des agents extérieurs. Tels sont, par exemple, le durcissement des chaux produit par l'acide carbonique de l'air, les gerçures qu'occasionnent souvent sur les enduits les variations de température et d'état hygrométrique, le délavage de certains mortiers par l'eau, l'augmentation de résistance que d'autres éprouvent quand on les immerge, enfin toutes les altérations, les fissures et les décompositions dues à l'action exercée sur les mortiers par différentes eaux chargées de sels et plus particulièrement par l'eau de mer.

Or, il est évident que, si la production de ces divers phénomènes dépend en grande partie des propriétés intrinsèques de l'agglomérant, elle n'est possible qu'autant que les agents qui la provoquent peuvent librement exercer leur activité, et que, par suite, elle doit être singulièrement influencée par la constitution physique du mortier, l'arrangement des grains qui le composent, l'abondance et les dimensions des vides qu'il renferme.

Il résulte donc de l'analyse qui précède que si, conformément à l'hypothèse qui nous a servi de point de départ, on fait abstraction de la qualité de l'agglomérant en la considérant comme invariable, c'est dans les modifications de la structure intime des mortiers suivant les conditions de leur fabrication qu'il faudra chercher la cause première de leurs différences, et que, par suite, on devra logiquement prendre pour base de toute comparaison une étude approfondie de leur compacité, ce mot étant employé avec le sens le plus général qu'il comporte.

Tel a été le principe de notre méthode.

Sauf dans quelques cas particuliers, nous avons toujours employé pour les expériences qui vont être citées des ciments Portland de la région de Boulogne satisfaisant aux conditions du cahier des charges des ports de Boulogne et de Calais.

En même temps, dans l'interprétation de leurs résultats nous avons de parti pris évité d'analyser les phénomènes chimiques dont les mortiers étaient le siège, nous contentant de signaler le cas échéant l'éventualité de réactions quelconques, de manière à obtenir une théorie aussi générale que possible.

Nous espérons qu'on reconnaîtra par la suite de cette note qu'en effet, dans bien des cas, les résultats trouvés s'appliquent également à des agglomérants de natures très différentes, au moins avec une approximation suffisante pour les besoins de la pratique.

Nous avons d'ailleurs entrepris depuis peu une nouvelle série d'expériences, trop peu avancées pour pouvoir être encore relatées utilement, et dans lesquelles nous avons opéré comparativement sur un grand nombre de produits de toutes sortes.

En raison de l'importance toute particulière que présente la question de la grosseur des sables, nous com-

mencerons par lui consacrer un chapitre spécial, puis nous passerons successivement à l'étude des différentes propriétés des mortiers et des divers phénomènes dont ils peuvent devenir le siège.

II. — COMPOSITION GRANULOMÉTRIQUE DES SABLES.

Séparation des cailloux. — Les sables que l'on rencontre dans la nature et dont on peut avoir à faire usage pour la fabrication des mortiers sont composés d'un ensemble de grains dont les dimensions varient dans la plupart des cas entre des limites très écartées. Tant que les grains fins dominant, on a affaire à un sable proprement dit; si, au contraire, les gros grains se rencontrent en plus grande abondance que les fins, l'ensemble constitue ce que l'on appelle un gravier; enfin, il peut se faire que le mélange contienne une proportion plus ou moins considérable de véritables cailloux.

Il est évident qu'on ne peut réunir sous un même vocable ni embrasser dans une étude commune des groupements aussi variables d'éléments aussi disparates. Le plus souvent même, dans la pratique des chantiers, on est obligé, pour obtenir une certaine régularité dans les mortiers, d'éliminer les cailloux que le sable peut contenir au moyen de claies ou de cribles à mailles plus ou moins larges suivant la nature des ouvrages à exécuter.

Aussi réserverons-nous désormais le nom de sable à tout ensemble de grains inférieurs à une dimension déterminée, et supposerons-nous implicitement chaque fois qu'il sera question de sables naturels, qu'on les aura préalablement débarrassés de tous les graviers ou cailloux supérieurs à cette dimension.

Nous avons cru nous conformer le mieux possible à l'idée évoquée ordinairement par le mot sable, en même temps qu'aux conditions généralement exigées de cette

matière en ce qui concerne la fabrication des mortiers, en définissant le sable proprement dit comme la réunion de tous les grains passant au tamis n° 6 du commerce dont les fils ont sensiblement 1 millimètre de diamètre et dont les vides des mailles sont des carrés mesurant 4 millimètres de côté. C'est ce que nous appellerons le tamis de 4 mailles par centimètre carré.

Sables calibrés. — En général, quand, dans les laboratoires, on se propose d'étudier l'influence de la grosseur du sable sur une propriété quelconque des mortiers, on emploie des sables calibrés, c'est-à-dire débarrassés de tous les grains trop gros restant sur un tamis donné, de même que de tous les grains trop fins passant à travers un autre tamis un peu plus fin que le premier. En faisant varier la grosseur des tamis, on obtient ainsi une série d'échantillons dont chacun est composé de grains sensiblement égaux entre eux.

Puis, opérant avec chacun de ces échantillons pris à part, on admet que les résultats obtenus s'appliqueront sensiblement au cas des sables naturels plus ou moins gros, c'est-à-dire dans lesquels *les grains prédominants* sont de dimensions plus ou moins considérables.

C'est là, croyons-nous, une manière de procéder défectueuse et qui, dans bien des cas, peut conduire à des conclusions absolument erronées. Nous allons essayer de le démontrer par un exemple.

Soit à rechercher comment varie suivant la dimension du sable, le volume des vides existant dans un mètre cube de ce sable mesuré toujours avec le même tassement.

Supposons qu'on opère comparativement avec des sables calibrés de grosseurs différentes et considérons le cas limite idéal où tous les grains de chaque échantillon seraient rigoureusement égaux et de même forme. On conçoit qu'alors ces grains, versés d'une même manière

dans la mesure, devraient s'y grouper suivant la même loi, quelle que soit leur grosseur commune, en donnant des ensembles géométriquement semblables, au changement d'échelle près, et dans lesquels le rapport des vides aux pleins serait le même (*).

Si l'on pouvait opérer de la sorte, on arriverait donc à conclure que le volume des vides est indépendant de la grosseur du sable.

Si à l'un de ces sables idéaux on ajoute des grains de dimensions un peu différentes, l'expérience montre, et cela s'explique aisément, que son volume plein réel tend dans une certaine mesure à augmenter en même temps que l'écart existant entre les dimensions des grains extrêmes.

Dès lors, on conçoit que les volumes des vides des divers sables calibrés sur lesquels on opère généralement doivent être sensiblement égaux et ne présenter entre eux d'autres écarts que ceux qui peuvent résulter du plus ou moins de différence existant entre les dimensions des mailles des deux tamis ayant servi à préparer chacun de ces sables.

Aussi n'est-il pas étonnant que divers expérimentateurs soient arrivés par ce moyen à des conclusions fort différentes. C'est ainsi que M. Candlot, ingénieur chimiste à la Société des ciments de Boulogne, a trouvé que le volume des vides augmentait avec la finesse du sable, tandis que pour M. l'ingénieur en chef Alexandre, ce volume passe par un maximum pour les grains de dimension moyenne :

(*) Si l'on suppose un sable théorique composé de grains sphériques égaux et incompressibles, considéré à son maximum de tassement (chaque sphère tangente à 12 autres), il est facile de calculer que le rapport du volume plein réel au volume total apparent du sable est, quel que soit le diamètre des sphères, égal à $\frac{\pi\sqrt{2}}{6}$, ce qui correspond à environ 26 p. 100 de vides.

EXPÉRIENCES DE M. CANDLOT (1)				EXPÉRIENCES DE M. ALEXANDRE (2)			
SABLE		Grosseur	Vides par litres	SABLE		Grosseur	Vides par litres
passant au tamis ayant par décimètre	retenu par le tamis ayant par décimètre			passant au tamis ayant par décimètre	retenu par le tamis ayant par décimètre		
10 mailles	20 mailles	gros gravier	0,390	»	»	»	»
20 id.	45 id.	grav. moyen	0,422	25 mailles	45 mailles	petit gravier	0,466
45 id.	75 id.	gros sable	0,439	45 id.	60 id.	id.	0,493
75 id.	110 id.	sable moyen	0,455	90 id.	110 id.	sable moyen	0,513
110 id.	185 id.	Sable fin	0,497	140 id.	175 id.	id.	0,500
185 id.	»	sable très fin	0,526	175 id.	280 id.	sable très fin	0,465

(1) Note sur l'emploi des matériaux hydrauliques, *Nouvelles annales de la construction*, 1890.
(2) Recherches expérimentales sur les mortiers hydrauliques, *Annales des ponts et chaussées*, 6^e série, XX, p. 284 (septembre 1890).

En réalité les sables naturels qu'on a l'occasion d'employer sur les chantiers ne sont plus ou moins gros que par la prédominance de telle ou telle catégorie de grains, mais contiennent toujours d'autres grains de dimensions souvent très différentes, dont les proportions et les différences relatives de grosseur influent seules sur les vides du mélange, puisque, comme on vient de le voir, des sables absolument réguliers mais de grosseur variables ne présenteraient entre eux aucune différence au point de vue du volume total de leurs vides.

Il en résulte que l'induction par laquelle on applique souvent aux sables naturels les conclusions auxquelles on a été conduit par des expériences faites sur des sables calibrés employés purs, est fautive et peut devenir le point de départ de graves erreurs.

Dès lors nous croyons que le principe à observer dans les recherches sur la grosseur des sables doit être, si compliqué que cela puisse paraître *a priori*, de comparer tous les sables qu'on peut avoir à employer dans la pratique à un nombre limité mais suffisant de types conve-

nablement choisis et étudiés d'avance une fois pour toutes, types composés par le mélange en proportions variables de sables calibrés de différentes grosseurs.

Nous nous trouvons donc ainsi amené à étudier la composition de chaque sable au point de vue des proportions de grains de différentes grosseurs qu'il contient, c'est-à-dire ce que nous appellerons désormais par abréviation la *composition granulométrique* de ce sable.

Méthode des mélanges. — Étant donné un sable quelconque débarrassé de ses cailloux au moyen du tamis de 4 mailles par centimètre carré et contenant des grains de toutes les grosseurs depuis 0 jusqu'aux plus gros passant encore à ce tamis, on peut, au moyen d'une série de tamis échelonnés, le séparer en autant qu'on veut de catégories de grains qui, recombinaisons ensemble en proportions variées, donneront autant qu'on voudra de mélanges artificiels dont les compositions granulométriques se rapprocheront d'autant plus de celles de tous les sables naturels possibles débarrassés de leurs cailloux, que le nombre des sables divisionnaires calibrés et celui des combinaisons qu'on en aura faites seront plus élevés.

Pour atteindre ce but sans toutefois trop multiplier le nombre des types à étudier, nous avons fait choix d'un sable inerte à grains anguleux, toujours bien homogène, obtenu par la mouture du quartzite de Cherbourg, et nous l'avons subdivisé par tamisage en trois grosseurs de grains définies comme il suit :

Gros grains	G :	{ passant au tamis de 4 mailles par cm ² (n° 6 du commerce), retenus par celui de 36 mailles (n° 15 du commerce).
Grains moyens	M :	{ passant au tamis de 36 mailles par cm ² (n° 15 du commerce), retenus par celui de 324 mailles (n° 50 du commerce).
Grains fins	F :	tous ceux qui passent au tamis de 324 mailles par cm ² (*).

(*) Depuis peu nous avons substitué avantageusement aux toiles métalliques

Puis nous avons recombinaé en proportions variées ces trois sables divisionnaires étalons, et nous avons étudié les propriétés des mélanges ainsi obtenus, au point de vue de la fabrication des mortiers.

Mais au moment d'entreprendre une aussi longue série d'essais, une difficulté se présentait : d'une part il était nécessaire d'examiner un grand nombre de mélanges afin de ne laisser passer aucune des particularités auxquelles pouvait donner lieu la variation progressive de leur composition granulométrique; mais en même temps il était à craindre qu'une trop grande multiplication des expériences ne compliquât fort la liste des résultats obtenus et n'en rendît l'intelligence bien difficile.

C'est alors que nous avons songé à l'emploi d'une méthode graphique d'interpolation qui a eu le double avantage de réduire considérablement le nombre des combinaisons à étudier et de montrer aux yeux d'une manière nette et précise l'ensemble des résultats fournis par tous les mélanges possibles des trois sables G, M, F, en en faisant ressortir les lois générales avec la plus grande facilité.

Cette méthode, base de la plupart des essais qui font l'objet de ce mémoire, repose elle-même sur les considérations suivantes :

des feuilles de cuivre minces percées de trous circulaires de diamètres connus, ce qui nous a permis de définir d'une manière bien plus précise les grosseurs de chaque catégorie de grains.

Les grosseurs ci-dessus définies correspondent alors sensiblement aux suivantes :

- | | | |
|------------|---|--|
| Grains G : | { | passant à travers un cercle ayant pour diamètre 5 millimètres, |
| | { | retenus par un cercle ayant pour diamètre 2 millimètres. |
| Grains M : | { | passant à travers un cercle ayant pour diamètre 2 millimètres, |
| | { | retenus par un cercle ayant pour diamètre 0 ^{mm} ,50. |
| Grains F : | { | tous les grains qui passent à travers un cercle ayant pour diamètre 0 ^{mm} ,50. |

Toutefois toutes les compositions granulométriques citées dans la suite de ce mémoire ont été déterminées au moyen des toiles métalliques.

Représentation graphique de la composition granulométrique des sables. — Soient g, m, f , les poids des trois sables, G, M, F contenus dans l'unité de poids d'un mélange sableux quelconque. Nous représenterons ce mélange par un point de l'espace ayant pour coordonnées par rapport à un système de trois axes rectangulaires

$$x = g, \quad y = m, \quad z = f.$$

De cette façon tout sable pourra être représenté par un point déterminé de l'espace et réciproquement, à un point de l'espace ne pourra jamais correspondre qu'un seul sable au maximum.

De ce principe bien simple on déduit immédiatement les conséquences suivantes :

Soient n sables ayant respectivement pour compositions granulométriques $g_1 m_1 f_1, g_2 m_2 f_2, \dots, g_n m_n f_n$. Mélangeons ces sables ensemble en prenant des poids $\alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_n$ de chacun d'eux. Le poids de sable G contenu dans le mélange sera $\alpha_1 g_1 + \alpha_2 g_2 + \dots + \alpha_n g_n$. De même le poids de sable M et de sable F seront égaux à des sommes analogues. La composition granulométrique du mélange sera donc donnée par :

$$g = \frac{\alpha_1 g_1 + \alpha_2 g_2 + \dots + \alpha_n g_n}{\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n} = \frac{\Sigma(\alpha_p g_p)}{\Sigma(\alpha_p)},$$

$$m = \frac{\alpha_1 m_1 + \alpha_2 m_2 + \dots + \alpha_n m_n}{\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n} = \frac{\Sigma(\alpha_p m_p)}{\Sigma(\alpha_p)},$$

$$f = \frac{\alpha_1 f_1 + \alpha_2 f_2 + \dots + \alpha_n f_n}{\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n} = \frac{\Sigma(\alpha_p f_p)}{\Sigma(\alpha_p)},$$

et les coordonnées de son point représentatif, par :

$$x = \frac{\Sigma(\alpha_p x_p)}{\Sigma(\alpha_p)}, \quad y = \frac{\Sigma(\alpha_p y_p)}{\Sigma(\alpha_p)}, \quad z = \frac{\Sigma(\alpha_p z_p)}{\Sigma(\alpha_p)}.$$

On voit par ces formules que le point représentatif du mélange ne sera autre que le centre de gravité d'un système de poids appliqués aux points représentatifs des

divers sables composants et égaux respectivement à

$$\frac{\alpha_1}{\Sigma(\alpha_p)}, \quad \frac{\alpha_2}{\Sigma(\alpha_p)}, \quad \dots \quad \frac{\alpha_n}{\Sigma(\alpha_p)},$$

c'est-à-dire aux poids de chacun des sables composants entrant dans l'unité de poids du mélange.

Or, si l'on suppose, comme nous l'avons fait au commencement de cette étude, qu'on n'emploie que des sables proprement dits, c'est-à-dire ne contenant pas de grains plus gros que ceux qui peuvent être rangés dans les catégories G, M et F, on aura constamment, quel que soit le sable, $g + m + f = 1$, et les points représentatifs de tous les sables étudiés se trouveront dans un plan également incliné sur les trois axes de coordonnées et les coupant à la distance 1 de l'origine. D'ailleurs, aucune des coordonnées ne pouvant être négative, tous ces points seront situés à l'intérieur ou sur les côtés du triangle équilatéral ayant pour sommets les points représentatifs des sables purs G, M et F.

Dès lors, prenant pour plan de la figure le plan $x + y + z = 1$, nous nous trouvons amenés à la construction plane suivante justifiée par les formules qui viennent d'être établies :

Dans un triangle équilatéral dont les sommets correspondent aux sables divisionnaires purs G, M et F, nous représenterons un sable quelconque de composition granulométrique g, m, f , par le centre de gravité d'un système de trois poids appliqués aux trois sommets du triangle et respectivement égaux aux proportions g, m et f des trois sables composants entrant dans le mélange considéré.

Il résulte de ce mode de construction qu'un sable quelconque sera représenté par un point du triangle et par un seul, et que, réciproquement, à un point pris à l'intérieur ou sur les côtés du triangle correspondra une composition granulométrique de sable et une seule. On voit

aussi que, si l'on considère deux sables quelconques représentés par les points A et B du triangle (*fig. 22*), le lieu des points représentatifs de tous les mélanges qu'on peut en faire sera le segment de droite AB, chaque mélange étant représenté par un point dont les distances aux points A et B seront inversement proportionnelles aux quantités de ces deux sables entrant dans sa composition.

Pratiquement on pourra déterminer le point représentatif A d'un sable g, m, f , en prenant sur le côté MG un point F', tel que $\frac{MF'}{MG} = \frac{g}{g+m}$, puis joignant F' F et prenant sur cette droite $\frac{AF'}{FF'} = f$.

On pourra encore considérer le point cherché A comme l'intersection de parallèles menées aux côtés du triangle à des distances de ces côtés respectivement égales aux produits gh, mh et fh , h mesurant la hauteur du triangle.

Inversement on pourra calculer les proportions des sables G, M, F entrant dans un sable représenté par un point A du triangle, en joignant les sommets au point A et prolongeant les droites ainsi obtenues jusqu'aux côtés opposés. On aura alors :

$$g = \frac{AG'}{GG'}, \quad m = \frac{AM'}{MM'}, \quad f = \frac{AF'}{FF'}.$$

On voit que le point représentatif d'un sable sera d'autant plus rapproché de l'un des sommets du triangle que ce sable contiendra une plus forte proportion du sable divisionnaire correspondant à ce sommet.

Par exemple, la droite MF étant le lieu géométrique des sables ne contenant pas de grains G, une droite parallèle à celle-ci et coupant le côté FG au dixième de sa longueur comptée à partir de F, sera le lieu des sables contenant 1/10 de leur poids de sable G, et de même

d'autres droites parallèles au côté MF et se rapprochant uniformément du point G correspondront à des sables contenant des proportions uniformément croissantes de gros grains.

Dans la *fig.* 22 nous avons divisé chacun des côtés du triangle en dix parties égales et par les points de division nous avons mené des parallèles aux côtés, déterminant ainsi 66 points d'intersection (y compris les points G, M, F), qui correspondent à toutes les compositions granulométriques pour lesquelles g , m et f sont des multiples entiers de 0,1; les cotes inscrites sur le prolongement des lignes permettent de lire immédiatement la composition granulométrique correspondant à chacun des points d'intersection.

On trouvera dans la *fig.* 12, dont l'explication est donnée à la fin de ce mémoire (p. 162), la représentation des compositions granulométriques d'un grand nombre de sables, principalement de ceux qu'on emploie sur les côtes de la Manche et de l'Océan.

Représentation des résultats d'expériences. — Supposons maintenant qu'il s'agisse de rechercher comment varie suivant la composition granulométrique du sable, une propriété quelconque de mortiers dont toutes les autres conditions de fabrication sont identiques. Soit par exemple à étudier les variations du volume total de mortier qu'on obtient en gâchant à bonne consistance plastique des mélanges de 500 kilogrammes d'un même ciment et d'un mètre cube de sables de même nature, mais de compositions granulométriques variables.

Nous déterminerons directement le volume en question pour un certain nombre de mélanges GMF distincts, par exemple pour les 66 types qui viennent d'être définis; puis, inscrivant les nombres obtenus à côté des points représentatifs des sables correspondants, nous les consi-

dériverons comme les cotes de points de l'espace reliés entre eux par une surface continue dont la forme caractérisera la loi cherchée.

Grâce à cette introduction de l'idée de continuité dans les résultats obtenus, nous pourrions induire d'un nombre fini d'essais les propriétés du nombre infini des compositions granulométriques possibles, quitte à multiplier un peu plus les expériences pour les régions où la surface subit des variations intéressantes et à en restreindre au contraire le nombre dans les parties du triangle où nous aurons reconnu que l'allure de la surface varie d'une manière lente et régulière.

Cette même continuité nous permettra en même temps de corriger les erreurs commises dans les expériences relatives à chaque sable au moyen des résultats obtenus pour les sables voisins, en un mot, de déterminer une surface topographique régulière passant le plus près possible des divers points de l'espace résultant directement des expériences.

Nous représenterons alors cette surface par la projection orthogonale sur le plan du triangle des lignes de niveau obtenues en la coupant par une série de plans horizontaux équidistants, lignes dont chacune sera en projection le lieu des points représentatifs de tous les sables jouissant à un même degré de la propriété étudiée.

C'est ainsi que, pour revenir au cas que nous avons choisi pour exemple, nous arriverons à établir que le volume de mortier à 500 kilogrammes fourni par 1 mètre cube de sable varie comme l'indiquent les courbes de la *fig. 60*, c'est-à-dire va d'une manière générale en augmentant suivant une certaine loi à mesure que la proportion des grains G diminue et que celle des grains F augmente. En même temps, le diagramme nous montrera que, pour tous les sables dont les points représentatifs

se trouvent sur la ligne cotée $1^{\text{m}^3},000$, le volume de mortier obtenu est égal au volume de sable employé, tandis qu'il est moindre (contraction) pour les sables situés à gauche de cette ligne, et supérieur (foisonnement) pour tous les autres. Enfin on reconnaîtra encore sur la figure que le rendement minimum est d'environ $0^{\text{m}^3},970$ et correspond à la composition granulométrique $g=0,93$ $m=0$ $f=0,07$, tandis que le rendement maximum atteint à peu près $1^{\text{m}^3},180$ pour la composition granulométrique $g=0,2$ $m=0$ $f=0,8$.

Toutefois il ne faudrait pas perdre de vue que la plupart des essais relatés dans la suite de ce mémoire ont été faits avec un même sable bien défini quant à sa nature et à la forme de ses grains, et n'auraient sans doute pas donné tout à fait les mêmes résultats avec d'autres natures de sable. En outre, chacun des sables divisionnaires G, M, F, est lui-même un ensemble de grains de grosseurs un peu différentes dont les proportions exercent aussi leur influence.

On ne peut donc pas prétendre que les données numériques obtenues avec les divers types étudiés s'appliquent exactement à tous les autres sables de même composition granulométrique.

Pourtant, ces réserves faites, on conçoit que les écarts dus aux variations dans la nature du sable, la forme de ses grains et la composition des sables divisionnaires, doivent être assez faibles quand on les compare à ceux qui résultent de changements de composition granulométrique du sable proprement dit. Aussi croyons-nous qu'on peut considérer l'approximation obtenue par l'emploi du quartzite de Cherbourg moulu comme suffisante pour faire prévoir l'allure des variations de capacité des mortiers dans la plupart des cas qui peuvent se rencontrer, et permettre d'en tirer quelques conclusions générales pour la pratique.

Division du sujet. — Ces prémisses posées, nous allons successivement examiner les diverses opérations dont se compose la fabrication des mortiers, savoir le mesurage du sable et du ciment, le mélange à sec de ces matières, l'addition d'eau et le malaxage et enfin la mise en œuvre du mortier obtenu.

Puis nous aborderons l'étude des mortiers frais au point de vue spécial de leur compacité, nous rechercherons comment leur contexture peut varier par suite de leur exposition prolongée dans certains milieux et influencer sur leurs diverses qualités, porosité, perméabilité, résistance chimique à la décomposition, résistance mécanique à la traction et à la compression.

Enfin nous résumerons ces diverses observations en faisant l'étude détaillée de deux séries particulières de mortiers et nous essayerons de dégager de l'ensemble des résultats cités quelques règles pratiques à observer dans le choix des matériaux et le mode de fabrication des mortiers.

III. — MESURAGE DU SABLE ET DU CIMENT (*).

Méthode généralement employée. — Dans la plupart des chantiers où l'on a à fabriquer de grandes quantités de mortier, il est d'usage de mesurer le sable au volume et le ciment au poids.

Cette manière de procéder est la plus logique, car le point à considérer est le volume qu'on pourra faire occuper par le mortier, volume qui généralement diffère peu de celui du sable employé, dont le ciment doit remplir les vides.

(*) Une partie des matières de ce chapitre a déjà fait l'objet d'un précédent rapport à la Commission des ciments, lequel a été reproduit presque intégralement par la *Revue du Génie militaire* (juillet-août, 1891).

Elle est aussi la plus pratique, attendu que la pesée du sable exigerait une main-d'œuvre plus compliquée, et que d'autre part le ciment est livré tout pesé par le commerce, généralement en sacs de 50 kilogrammes ou en barils de 200 kilogrammes.

Par contre, le mesurage du sable au volume ne présente pas la même exactitude que la pesée et peut donner lieu à d'importantes erreurs de dosage.

C'est ce que nous croyons avoir mis en évidence par les diverses expériences décrites ci-dessous.

Influence de l'humidité. — Une des principales causes pouvant occasionner des écarts dans le dosage des mortiers consiste en ce que le tassement du sable dans les jauges est extrêmement variable suivant le degré d'humidité de cette matière. L'humidité a pour effet, tant qu'elle ne dépasse pas une certaine limite, de s'opposer au glissement des grains les uns sur les autres et par suite au tassement du sable.

Nous avons fait l'expérience avec deux échantillons de sable différents, l'un, très fin, provenant d'une dune à Boulogne, l'autre, plus gros, ramassé sur la côte et qu'on emploie presque exclusivement pour les travaux dans le même port. Ces sables étaient versés à la pelle, d'une manière aussi régulière que possible, dans une boîte de 50 litres analogue aux brouettes jaugées qui servent généralement sur les chantiers pour le mesurage du sable employé à la fabrication des mortiers. Chacun, préalablement bien séché jusqu'à ce qu'un échantillon pris dans sa masse n'éprouvât plus de perte de poids par séchage à 100°, a été additionné de poids d'eau progressivement croissants. Après chaque nouvelle addition d'eau, on avait soin de bien mélanger la matière de manière à la rendre parfaitement homogène, et on déterminait le poids de la boîte de 50 litres. On en déduisait le poids du

mètre cube mesuré dans les mêmes conditions que sur le chantier, de même que le poids de sable sec contenu dans un mètre cube de sable humide.

Les poids trouvés ont été les suivants :

Proportion d'eau mouillant 100 ^{ks} de sable sec (en kilogr.)	0	0,500	1	2	3	5	10	
Perte de poids subie après séchage par 1 ^{ks} de sable humide (en gramm)	0	5,0	9,9	19,6	29,1	47,6	90,8	
Sable de Dune. {	Poids de 1 ^{m3} de sable humide (en kilogr.)	1.458	1.310	1.238	1.213	1.209	1.208	1.266
	Poids de sable sec contenu dans 1 ^{m3} de sable humide (en kilogr.)	1.458	1.304	1.226	1.189	1.174	1.151	1.149
Gravier de côte. {	Poids de 1 ^{m3} de sable humide (en kilogr.)	1.514	1.463	1.412	1.260	1.221	1.229	1.305
	Poids de sable sec contenu dans 1 ^{m3} de sable humide (en kilogr.)	1.514	1.456	1.398	1.235	1.185	1.171	1.187

On voit qu'une très faible proportion d'eau suffit pour abaisser énormément le poids du sable sec entrant dans un mètre cube. Ainsi pour 2 p. 100 d'eau, ce poids est inférieur d'environ 20 p. 100 à celui du même sable mesuré sec. Quand le degré d'humidité augmente, ce poids tend à devenir constant et même à remonter légèrement.

Voici d'autres résultats obtenus avec des sables naturels non débarrassés de leurs cailloux :

PROVENANCE	NATURE du sable	POIDS de cailloux contenu par 100 ^{ks} de sable brut	COMPOSITION granulométrique de sable proprement dit			SABLE SEC — Poids du mètre cube	SABLE HUMIDE	
			G	M	F		Degré d'humidité	Poids du mètre cube
Cosqueville (près de Cherbourg).	granitique à grains arrondis	p. 100				kg	p. 100	kg
		4,0	0,136	0,723	0,141	1.586	0,8	1.495
Saint-Anne (près de Cherbourg).	schisteux	25,4	0,359	0,293	0,348	1.753	1,2	1.650
Urville (près de Cherbourg).	schisteux	6,6	0,259	0,412	0,329	1.600	1,8	1.332

On se rendra un compte plus exact des variations de poids dues aux différences d'humidité par l'examen de la *fig. 1*, qui est la traduction graphique des résultats obtenus avec le sable de dunes.

Le tableau ci-dessous, déduit des mêmes nombres, montre combien la richesse du mortier peut différer suivant le degré d'humidité du sable.

SABLE DE DUNE	DOSAGES à obtenir (poids du ciment par mètre cube de sable sec)	DOSAGES qu'on obtiendrait en employant du sable humide au lieu de sable sec					POIDS DE CIMENT à employer par mètre cube de sable humide pour obtenir les dosages proposés					
		0	0 ^{kg} ,5	1 ^{kg}	2 ^{kg}	3 ^{kg}	5 à 10 ^{kg}	0 ^{kg} ,5	1 ^{kg}	2 ^{kg}	3 ^{kg}	5 à 10 ^{kg}
Proportion d'eau mouillant 100 ^{kg} de sable sec	0											
	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
200 par m. cub.	224	238	245	249	254	179	168	163	161	158		
300 id.	333	337	368	373	381	269	253	244	241	236		
400 id.	446	486	490	497	508	359	336	326	321	315		
500 id.	539	595	612	621	634	448	421	408	402	394		
600 id.	670	714	735	745	761	538	505	489	482	473		
800 id.	895	951	980	995	1.015	716	671	652	643	630		
1.000 id.	1.119	1.190	1.226	1.242	1.270	895	840	816	804	788		
1.500 id.	1.676	1.784	1.839	1.864	1.902	1.342	1.261	1.223	1.208	1.183		

Il en résulte qu'en général les mortiers sont plus riches en hiver qu'en été, et qu'on doit se méfier de ceux qui sont fabriqués après une longue durée de sécheresse, comme devant être plus maigres que la moyenne.

La loi qui vient d'être établie relativement à la variation du tassement des sables suivant leur degré d'humidité cesse d'être exacte quand la proportion d'eau dépasse une certaine limite, laquelle est d'autant plus élevée que le sable contient une plus forte proportion de grains fins. Dans ce cas, le tassement augmente avec la quantité d'eau, et peut devenir supérieur à celui du sable sec. C'est ainsi qu'un des moyens employés dans la pratique pour accélérer le tassement de remblais en sable consiste à les arroser à grande eau.

On fait souvent l'expérience en petit en emplissant de sable une mesure jaugée et versant de l'eau par-dessus. Aussitôt on voit le niveau baisser, de sorte que le volume occupé par le sable et l'eau réunis est inférieur à celui du sable sec. Toutefois ce procédé se prêterait mal à une mesure exacte de tassement. Il serait préférable de faire arriver l'eau par la partie inférieure de la masse du sable, de manière qu'en montant progressivement, le liquide puisse chasser à travers la couche supérieure de sable sec l'air auquel il se substitue. D'ailleurs, les résultats obtenus ainsi seraient sans doute très variables non seulement suivant la nature du sable, mais aussi suivant la forme et la capacité du vase employé.

Nous avons fait l'expérience d'une autre manière en délayant avec beaucoup d'eau le sable à l'état de bouillie liquide et versant cette bouillie dans une éprouvette graduée. Après repos de quelques heures, l'eau en excès était remontée à la surface et nous lisions le volume occupé par le sable mouillé. Nous avons ainsi constaté que le poids de sable de dune qui, mesuré sec et sans tassement, occupait un volume d'un litre, n'occupait plus, saturé d'eau, que 0^{lit},888.

Sables contenant des cailloux. — Dans certains chantiers, soit par négligence, soit par économie, soit qu'on n'y voie aucun inconvénient, soit même qu'on y trouve quelque avantage, on emploie le sable avec les cailloux qu'il peut contenir; dans d'autres, au contraire, on a soin de les éliminer par un tamisage préalable. Il est certain que c'est là une opération indispensable dans bien des cas, comme par exemple lorsque le mortier est destiné à remplir des joints de maçonneries. Mais, il en est d'autres où l'on peut se demander quelle en peut être l'influence.

En premier lieu, il convient de remarquer qu'un sable

contenant des cailloux devra peser plus lourd à volume égal que le même sable passé à la claie, puisque les cailloux rempliront de matière pleine un espace qui, s'ils n'existaient pas, serait occupé par des grains de sable séparés par des vides.

Toutefois, il n'en serait plus de même si la proportion de cailloux était assez considérable pour que ceux-ci arrivent à se toucher en laissant entre eux des vides que la trop faible proportion de sable mélangé ne suffirait pas à boucher entièrement. Mais, c'est là un cas qui ne présente guère d'intérêt au point de vue de la fabrication des mortiers, attendu qu'on n'aurait jamais l'idée d'employer comme sable un pareil mélange.

Ces observations se trouvent confirmées par l'expérience suivante faite en mélangeant en différentes proportions un sable pur et des cailloux.

Nous avons pris pour sable du gravier de côte de Boulogne passé au tamis de 4 mailles par centimètre carré et pour cailloux un mélange de deux parties en poids de cailloux passant à l'anneau de 10 millimètres de diamètre et retenus par le tamis de 4 mailles au centimètre carré, et d'une partie de cailloux passant à l'anneau de 20 millimètres de diamètre et retenus par l'anneau de 10 millimètres. Les poids obtenus sont donnés par le tableau suivant et représentés graphiquement par les ordonnées de la *fig. 2* qui montre la loi de leur variation suivant la composition du mélange.

Proportion de sable en poids.	100	97	91	85	70	55	40	25	10	0
Proportion de cailloux en poids	0	3	9	15	30	45	60	75	90	100
Poids du mètre cube du mélange (déterminé sur 50 litres) (en kilogr.).	1.600	1.625	1.656	1.686	1.744	1.769	1.730	1.604	1.473	1.386

Il semble résulter de cette loi que, tant que la propor-

tion de cailloux mélangée au sable n'est pas trop forte, du moment que le poids du mètre cube de sable augmente avec elle, les mortiers obtenus en prenant un même poids de ciment par mètre cube de sable doivent être d'autant plus maigres que le sable contient plus de cailloux. Pourtant, c'est plutôt le contraire qui a lieu, car en réalité le poids de sable proprement dit contenu dans 1 mètre cube de sable mélangé est inférieur au poids du mètre cube de sable pur, et donne avec le ciment un mortier plus riche au milieu duquel se trouvent disséminés sans guère l'amaigrir les cailloux introduits avec le sable.

Par exemple, un mortier à P kilogrammes de ciment par mètre cube du sable ci-dessus étudié contenant 15 p. 100 de cailloux sera composé de

Ciment		P^{kg}	}	Mortier proprement dit.
Sable	85 p. 100 de	$1.686^{kg} = 1.433^{kg}$		
Cailloux	15 id. de	$1.686 = 253^{kg}$		

Cailloux noyés dans le mortier.

tandis qu'un mortier à P kilogrammes de ciment par mètre cube de sable pur contiendra :

Ciment	P^{kg}
Sable	1.600^{kg}

Toutefois, ce raisonnement suppose que la proportion de cailloux n'est pas trop considérable.

Il n'en sera plus de même si l'on emploie pour la fabrication du mortier certains broyeurs qui, tout en triturant la pâte, écrasent les cailloux introduits avec le sable. Dans ce cas, le poids de sable proprement dit fourni après broyage par 1 mètre cube de sable brut sera supérieur au poids d'un mètre cube de sable tamisé et le mortier subira par le fait des meules un amaigrissement dont il faudra tenir compte dans le calcul initial du dosage.

Composition granulométrique du sable. — La compo-

sition granulométrique d'un sable exerce une grande influence sur le poids qu'il peut atteindre par mètre cube mesuré dans des conditions identiques.

Nous avons fait l'expérience avec les trois sables étalons G, M, F définis plus haut mélangés en diverses proportions. Chaque mélange était versé bien sec à la pelle sans autre tassement dans une boîte de 50 litres (profondeur = 20^{cm}) placée à la hauteur d'une brouette ordinaire de chantier.

Les poids trouvés nous ont conduit par la méthode décrite au chapitre précédent à la *fig.* 23 qui constitue la solution de la question. Les cotes inscrites le long des courbes de niveau représentent, non le poids du mètre cube de sable, mais la fraction du volume de la mesure occupée réellement par la matière. On en déduit le poids du mètre cube en les multipliant par 2,65, poids spécifique du sable étudié, et le volume des vides par mètre cube en les retranchant de l'unité.

On voit que le volume plein réel, sensiblement le même pour les trois sables G, M, F purs et égal à la moitié du volume apparent (poids du m³ = environ 1.325^{kg}), augmente rapidement à mesure que les mélanges deviennent plus complexes et atteint pour une composition granulométrique voisine de $g = 0,6$ $m = 0$ $f = 0,4$ son maximum d'environ 0,638 (poids = 1.686^{kg}) supérieur de 30 p. 100 à son minimum.

Si donc on se base sur le volume des vides du sable pour déterminer la quantité de ciment qu'on devra lui combiner, cette quantité de ciment devra être d'autant plus forte que le sable sera plus régulier, conclusion qu'il était facile de prévoir *a priori* et qui ressort immédiatement du diagramme.

Capacité des jauges et manière de les remplir. — Il est évident que les conditions de mesurage du sable doivent

influer sur le tassement des grains et par suite sur le poids calculé pour 1 mètre cube. La profondeur de la boîte servant de mesure, la quantité de sable introduite à la fois (contenu d'une pelletée), la hauteur dont on la laisse tomber, les trépidations imprimées ou non à la boîte pendant le remplissage, le tassement variable donné ou non avec le plat de la pelle sur la surface du sable, le dérasage plus ou moins parfait de la mesure pleine, sont autant de facteurs dont on doit tenir compte et qu'il est nécessaire de spécifier quand on cite une expérience.

Toutefois leur influence n'est pas la même pour tous les sables. Tandis qu'elle est relativement faible pour les sables composés de grains assez gros et de dimensions peu différentes, elle augmente rapidement quand le sable devient plus mélangé, et en particulier quand il contient des proportions croissantes de grains fins.

Cette loi, facile à expliquer par la pénétration progressive des grains fins dans les intervalles des plus gros, est bien mise en évidence par les *fig.* 26, 27, 28 et 29.

Les expériences ont été faites en remplissant au moyen d'une cuiller une mesure cylindrique d'un litre des divers mélanges sableux étudiés, une première fois en évitant de donner à la mesure aucune secousse (*fig.* 26), puis une seconde fois en imprimant de légers chocs aux parois de la boîte pendant toute la durée du remplissage et ajoutant toujours de la matière jusqu'à ce que de nouvelles trépidations n'amenassent plus aucune réduction de volume (*fig.* 27).

En comparant la *fig.* 26 à la *fig.* 23, on voit que le tassement des sables purs G, M, F a été à peu près le même quelle que fut la dimension de la mesure employée, tandis que celui des mélanges a été plus faible dans la mesure d'un litre que dans celle de 50 litres.

La *fig.* 28, résultant de la comparaison des *fig.* 26 et 27, représente le tassement absolu dont chaque sable a

été susceptible, c'est-à-dire le volume réel de sable qu'on a pu ajouter à celui qui, sans tassement, occupait la mesure d'un litre.

La *fig. 29* représente le tassement relatif, c'est-à-dire le même volume exprimé en fonction du volume réel de sable non tassé.

On voit que, de quelque manière qu'on l'évalue, le tassement augmente en même temps que la proportion de sable F , sauf dans la *fig. 28*, près du sommet F , une petite anomalie due sans doute à l'intervention de forces capillaires.

Forme des grains. — Enfin, on conçoit que la forme des grains d'un sable doive aussi influencer sur le poids du litre, leur disposition relative dans la jauge devant nécessairement varier suivant leur forme.

C'est ce que nous avons constaté par l'expérience suivante faite avec quatre sables de natures différentes amenés à avoir même composition granulométrique ($g=0,5$ $m=0,3$ $f=0,2$).

NATURE DU SABLE	GRAINS	VOLUME PLEIN RÉEL par litre de sable	
		non tassé	tassé à refus
Résidu du concassage de quartzite de Cherbourg dans un appareil à mâchoires	lamelleux	litres 0,525	litres 0,654
Coquillages concassés.	plats	0,557	0,682
Quartzite de Cherbourg moulu.	anguleux	0,579	0,726
Sable granitique naturel	arrondis	0,651	0,744

Nous indiquons seulement ici le volume plein réel pour nous affranchir des variations de poids dues aux différences de poids spécifique de ces matières. On voit qu'il va en augmentant à mesure que les grains du sable se rapprochent plus de la forme ronde.

Conclusion. — En résumé, il ressort de tout ce qui précède que le poids du mètre cube de sable est susceptible de varier entre des limites assez écartées, non seulement avec la composition granulométrique, mais aussi suivant la manière dont un même échantillon est mesuré.

C'est ainsi que nous avons trouvé pour le sable de dunes de Boulogne les divers nombres suivants :

CONDITIONS DE L'EXPÉRIENCE	POIDS calculé de sable sec entrant dans l'unité de volume.	VOLUME de l'eau et des vides restant entre les grains du sable (densité = 2,65)
Sable sec versé à la pelle dans une mesure de 50 litres.	1.458	0,450
Sable plus ou moins humide mesuré dans les mêmes conditions.	de 1.458 à 1.449	de 0,450 à 0,567
Sable sec versé sans tassement dans une mesure de 1 litre	1.471	0,445
Sable sec tassé à refus par trépidations dans une mesure de 1 litre.	1.721	0,350
Sable saturé d'eau mesuré dans une éprouvette de 1 litre	1.636	0,375

De la diversité de ces résultats on peut conclure qu'à un même dosage nominal de ciment peuvent, si l'on n'y prend garde, correspondre des dosages réels très différents.

Ce tableau montre en même temps qu'il n'y a pas grande confiance à avoir dans les calculs par lesquels on a souvent la prétention de déterminer la proportion minimum de ciment qu'il convient de combiner à un sable donné pour obtenir un mortier compact.

En effet, ce poids de ciment est calculé d'après le volume des vides existant dans le sable mesuré plus ou moins sec et plus ou moins tassé, volume extrêmement variable, comme on vient de le constater, et qui a for-

tiori peut différer dans une très large mesure de celui des intervalles restant entre les grains du même sable réduit à l'état de mortier par l'introduction du ciment et de l'eau et le malaxage plus ou moins prolongé de la pâte ainsi obtenue.

En admettant pour un moment que ce vide soit comparable à celui du sable saturé d'eau, soit 0,375 pour le cas du sable de dune, le poids de ciment qu'on en déduirait serait à celui calculé pour le sable contenant 5 p. 100 d'humidité comme 375 est à 567, soit environ dans le rapport de 2 à 3.

D'ailleurs, nous verrons plus loin qu'il existe pour chaque sable une proportion minimum de vides qu'on ne peut arriver à combler, quel que soit le poids de ciment introduit dans le mortier.

Mesurage du ciment au volume. — La plupart des causes d'erreurs qui viennent d'être signalées relativement au jaugeage du sable exercent aussi leur influence quand, au lieu de peser le ciment, on le mesure au volume. C'est là d'ailleurs un fait maintenant bien connu et sur lequel il serait superflu d'insister. Dans l'une de ses communications au Congrès des procédés de construction en 1889, M. l'ingénieur en chef Quinette de Rochemont a donné comme équivalents le poids de 1.250 kilogrammes mesuré au litre et celui de 1.350 kilogrammes mesuré à l'hectolitre. Le pesage du ciment conduira donc toujours à des résultats plus réguliers, et devra par suite être préféré.

Mélange du sable et du ciment. — Il est à peine utile de rappeler que pour obtenir un mortier bien homogène on doit mélanger parfaitement le ciment et le sable à sec avant l'introduction de l'eau de gâchage. A ce point de vue il y a lieu d'éviter autant que possible l'emploi du

sable humide qui en général se laisse plus difficilement pénétrer par le ciment.

De même après mouillage du mélange on doit faire en sorte par un malaxage suffisant, que l'eau arrive au contact de chaque parcelle de matière et se trouve uniformément répartie dans toute la masse du mortier. Dans cet ordre d'idées on ne saurait trop recommander pour les grands chantiers l'emploi des broyeurs à meules où le mortier est soumis à une trituration énergique qui en rapproche les molécules et lui donne son maximum de serrage.

IV. — PROPORTION D'EAU A EMPLOYER POUR LE GÂCHAGE.

Variabilité de la proportion d'eau de gâchage. — La proportion d'eau qu'il est nécessaire d'employer pour amener les mortiers à avoir une consistance permettant de les manier commodément varie entre des limites très étendues suivant la nature et la grosseur du sable et de l'agglomérant dont on fait usage et les proportions dans lesquelles on combine ces deux matières. D'ailleurs, pour un même mélange d'un même sable et d'un même ciment, elle dépend encore de la consistance que l'on veut obtenir. Il est donc nécessaire, avant d'entreprendre une étude comparée des mortiers, de bien définir la consistance normale à laquelle on s'efforcera toujours de les amener, et de rechercher la loi de variation de la quantité d'eau correspondante, suivant la richesse des mortiers et la nature des éléments qui les constituent.

Consistance normale des pâtes de ciment pur. — Pour le cas des pâtes de ciment pur, le cahier des charges de Boulogne et de Calais définit comme il suit la consistance normale à laquelle on doit amener tous les échantillons

soumis aux essais, en même temps que la proportion d'eau correspondante :

Le mortier sera obtenu en prenant 900 grammes de ciment et versant d'un seul coup la quantité d'eau à employer. Le mélange et le gâchage seront faits à la truelle sur une plaque de marbre pendant cinq minutes comptées à partir du moment où l'eau aura été versée.

La quantité d'eau ajoutée sera considérée comme donnant la proportion normale, si le mortier ainsi obtenu forme une pâte ferme mais bien liée, brillante et plastique, satisfaisant aux conditions suivantes :

1° La consistance de la pâte ne doit pas changer sensiblement si le gâchage est prolongé pendant trois minutes au delà de la durée initiale de 5 minutes ;

2° Une petite quantité de pâte étant prise avec la truelle, si on la laisse tomber sur le marbre d'une hauteur de 50 centimètres environ, elle doit se détacher de la truelle sans y laisser aucune partie adhérente, et après sa chute conserver à peu près sa forme sans qu'il se produise aucune crevasse ;

3° Une petite quantité de pâte étant prise dans la main, il devra suffire de lui imprimer quelques légères secousses pour lui donner une forme arrondie, et faire venir l'eau à la surface ; elle ne devra dans cette opération ni s'aplatir complètement, ni s'attacher à la peau, et si on laisse tomber la boulette ainsi formée d'une hauteur de 0^m,50, elle devra conserver, en s'affaissant légèrement, une forme arrondie, sans présenter aucune crevasse ;

4° La proportion d'eau doit d'ailleurs être telle que, le gâchage étant effectué avec une quantité d'eau moindre, la pâte soit sèche, peu liée, et se crevasse en tombant de la truelle ou de la main ; elle doit être telle, d'autre part, qu'une faible augmentation de la quantité d'eau (de 1 à 2 p. 100 au plus du poids de ciment) suffise pour changer la nature de la pâte, la ramollir et lui donner une consistance boueuse caractérisée par l'adhérence à la truelle et une tendance à s'aplatir en s'attachant à la main, tendance qui ne permet pas de la mettre en boule en procédant comme on l'a dit ci-dessus.

Ce dernier changement de caractère, produit par le passage de la consistance plastique à la consistance boueuse, étant le plus nettement tranché, on fera d'abord le gâchage avec une quantité d'eau assez faible pour donner une pâte trop sèche. Puis on recommencera l'opération le nombre de fois nécessaire ;

en opérant chaque fois sur une nouvelle quantité de 900 grammes de ciment et en augmentant progressivement chaque fois de 20 centimètres cubes la quantité d'eau jusqu'à ce que, une opération ayant donné, avec une certaine proportion d'eau, une pâte de consistance ferme et plastique, l'opération suivante avec 20 centimètres cubes d'eau de plus donne une pâte boueuse. On fera alors un dernier essai avec 10 centimètres cubes d'eau de moins que dans l'opération qui aura donné la pâte boueuse.

On adoptera, comme proportion normale, la plus forte proportion d'eau essayée qui aura encore donné lieu à une pâte plastique et non boueuse, satisfaisant aux conditions 1°, 2°, 3° et 4° ci-dessus énoncées.

La règle adoptée en Allemagne, en Autriche, en Suisse et en Russie à la suite des conférences de Munich (1884), de Dresde (1886) et de Berlin (1890), repose sur l'emploi d'un appareil spécial analogue à l'aiguille de prise et consistant en une tige cylindrique d'un centimètre de diamètre chargée de manière à peser 300 grammes. Pour déterminer la consistance normale, on pèse 400 grammes du produit à étudier, on le gâche pendant trois minutes s'il est à prise lente ou une minute s'il est à prise rapide, on introduit la pâte dans un moule cylindrique mesurant 8 centimètres de diamètre sur 4 centimètres de hauteur, on la dérase et on y fait descendre avec précaution l'aiguille qui vient d'être décrite. On considère la consistance comme convenable quand l'extrémité inférieure de l'aiguille s'arrête à 6 millimètres au-dessus du fond de la boîte.

Des essais comparatifs nous ont montré que les consistances obtenues par les deux méthodes étaient à peu près les mêmes.

Consistance normale des mortiers sableux. — S'il est assez facile de définir d'une manière précise la consistance d'une pâte de ciment pur, il n'en est plus de même lorsqu'il s'agit de mortiers sableux.

D'une part la plasticité et l'aspect extérieur de pareils mélanges varient avec leur richesse en ciment et la grosseur du sable, de sorte que les caractères qui dans le cahier des charges sont le criterium de la bonne consistance, se trouvent altérés quand la proportion de sable incorporée au ciment devient un peu considérable.

D'autre part nous avons essayé d'employer la tige cylindrique d'un centimètre pour comparer les consistances des divers mortiers, espérant que la surface relativement grande de sa section rendrait négligeable l'influence des variations de grosseurs des grains de sable; mais nous avons reconnu immédiatement en opérant sur des mortiers à divers dosages faits avec des sables de compositions granulométriques différentes et gâchés avec des proportions d'eau telles qu'ils parussent présenter tous à peu près la meilleure consistance dont ils étaient susceptibles, que l'épaisseur de pâte non traversée par la tige augmentait d'une manière très notable en même temps que la proportion et la grosseur du sable introduit.

En présence de cet insuccès et à défaut de méthode plus sûre, nous avons donc dû revenir à l'appréciation de la consistance des mortiers d'après leur aspect extérieur en nous basant sur l'observation des états successifs par lesquels ils passent quand on augmente progressivement la proportion d'eau employée à les gâcher.

Quand cette proportion est relativement faible, le mortier est friable et difficile à rassembler en une masse suffisamment liée; si l'on y réussit le moindre effort suffit à le séparer de nouveau.

L'eau augmentant, la cohésion augmente en même temps et il arrive un moment où la pâte, sans présenter une plasticité comparable à celle du ciment pur, est néanmoins bien liée et bien malléable sans être molle, surtout si le mortier n'est pas trop maigre. A cet état le mortier réuni sur la table de gâchage garde sensiblement la

forme qu'on lui donne; si on le lisse avec le plat de la truelle, on voit l'eau apparaître à sa surface.

C'est cette consistance que nous avons choisie comme normale.

Un peu d'eau en plus donne une pâte plus molle quoique encore assez plastique. Enfin, si l'on emploie une plus grande quantité d'eau, on obtient une bouillie plus ou moins liquide qui s'étale sur la table ou laisse échapper une partie de l'eau en excès.

Il est souvent assez difficile d'apprécier à quel moment le mortier présente exactement la consistance convenable. Du reste son état est encore variable suivant la durée du gâchage, surtout s'il contient beaucoup de ciment. Il est donc nécessaire que la détermination de la proportion d'eau à employer soit faite par un opérateur exercé malaxant toujours de la même manière des quantités de mortier peu différentes.

A cette condition on obtiendra des résultats assez comparables. Toutefois on s'affranchira d'une manière plus certaine des légers écarts dus aux erreurs d'expérience inévitables, si l'on arrive à déterminer la loi suivant laquelle la quantité d'eau de gâchage varie en même temps que la composition des mortiers, loi qui permettra de calculer d'avance la proportion d'eau convenant à chaque mélange.

Tel est le but que nous avons poursuivi par un grand nombre d'expériences dont nous allons citer les principales.

Influence de la richesse des mortiers. — Si l'on détermine conformément aux indications qui précèdent, les quantités d'eau nécessaires pour amener à consistance plastique des mélanges en proportions variables d'un même ciment et d'un même sable, on constate qu'elles vont en décroissant suivant une certaine loi à mesure que le mortier devient plus maigre.

Le tableau suivant donne les résultats trouvés pour trois échantillons de ciments et de chaux et quatre sables naturels dont les compositions granulométriques sont représentées par les points A, B, C, D de la *fig. 12*.

COMPOSITION en poids du mélange		POIDS D'EAU TROUVÉS NÉCESSAIRES pour gâcher 100 parties en poids de mélange sec											
		Sable A (Belle-Iste- en-Mer) calcaire à grains ronds			Sable B (environs de Boulogne) un peu coquillier			Sable C (environs de Cherbourg) granitique, grains arrondis			Sable D (sable de dunes de Boulogne) siliceux		
		0,177 G + 0,773 M + 0,050 F			0,151 G + 0,359 M + 0,490 F			0,574 G + 0,356 M + 0,070 F			0,004 G + 0,062 M + 0,934 F		
Ciment ou chaux	Sable	Ciment Portland	Ciment de laitier	Chaux hydrau- lique	Ciment Portland	Ciment de laitier	Chaux hydrau- lique	Ciment Portland	Ciment de laitier	Chaux hydrau- lique	Ciment Portland	Ciment de laitier	Chaux hydrau- lique
pur	0	26,6	35,0	40,3	26,6	35,0	40,3	26,6	35,0	40,3	26,6	35,0	40,3
7	1	24,9	30,5	36,7	24,8	31,2	37,5	24,0	30,5	35,6	23,5	30,3	35,2
6	2	22,3	27,0	32,1	22,0	27,0	32,1	20,0	26,5	31,0	21,4	26,7	31,5
5	3	19,2	23,0	27,9	20,0	23,2	27,0	18,5	22,6	25,9	20,4	23,9	27,4
4	4	17,8	20,0	23,8	17,4	19,7	23,6	16,2	18,6	21,4	19,1	21,7	23,1
3	5	16,3	17,1	19,9	16,2	16,9	19,8	12,0	14,3	16,6	17,8	17,9	20,5
2	6	14,7	14,9	16,1	15,3	15,4	17,6	10,0	11,5	13,2	17,7	18,3	18,4
1	7	13,1	13,1	15,2	15,2	14,7	16,9	7,3	8,1	8,7	17,3	17,8	17,3

Ces nombres, obtenus directement par l'expérience, nous ont servi à tracer les diagrammes de la *fig. 16* qui indiquent les proportions d'eau correspondant à n'importe quel mélange de l'un des trois agglomérants avec l'un des quatre sables considérés.

Les poids d'agglomérant entrant dans chaque mélange étant portés en abscisses et les proportions d'eau en ordonnées, on voit que les lignes obtenues sont des courbes légèrement concaves vers la direction des proportions d'eau croissantes. On en conclut que la proportion d'eau nécessaire pour amener à consistance plastique un mélange de sable et de ciment est un peu moindre que la somme des quantités d'eau qu'il faudrait employer pour gâcher séparément les poids de sable et de ciment entrant dans

le mélange, car s'il y avait égalité les lignes obtenues seraient des droites.

On peut d'ailleurs s'en rendre compte expérimentalement en gâchant séparément à bonne consistance un mortier riche et un mortier maigre composés avec un même ciment et un même sable, et mélangeant ensuite les deux pâtes. Presque toujours on constate que la consistance du mélange est plus molle que celle de chacun des deux mortiers ayant servi à l'obtenir.

Cette loi se trouve surtout vérifiée avec les sables fins. Avec les gros sables, comme le sable C, les points sont sensiblement en ligne droite, de sorte que, si l'on appelle E_c et E_s les poids d'eau nécessaires pour gâcher à bonne consistance des poids 100 de ciment et de sable supposés purs, celui qui conviendra pour un mélange où le ciment et le sable entrent dans les proportions P_c et P_s ($P_c + P_s = 1$), ne sera autre que $E_c P_c + E_s P_s$. Ainsi, en admettant que le sable C exige pour être gâché pur 3,5 p. 100 de son poids d'eau, on calcule pour les différents mortiers étudiés plus haut les proportions d'eau données par le tableau ci-dessous, lesquelles, comme le montrent les colonnes des écarts, diffèrent bien peu des nombres trouvés directement par l'expérience.

COMPOSITION en poids du mélange		PROPORTION D'EAU calculée 3,5% du sable C + n% du ciment			ÉCART ENTRE LA PROPORTION trouvée par l'expérience et la proportion calculée		
Ciment ou chaux	Sable C	Ciment Portland n = 26,6	Ciment de laitier n = 35,0	Chaux hydraulique n = 40,3	Ciment Portland	Ciment de laitier	Chaux hydraulique
7	1	23,7	31,0	35,7	+0,3	-0,5	+0,9
6	2	20,9	27,1	31,1	-0,9	+0,6	-0,1
5	3	18,0	23,2	26,5	+0,5	-0,6	-0,6
4	4	15,1	19,3	21,9	+1,1	-0,7	-0,5
3	5	12,2	15,3	17,3	-0,2	-1,0	-0,7
2	6	9,3	11,4	12,7	+0,7	+0,1	+0,5
1	7	6,4	7,5	8,1	+0,9	+0,6	+0,6

Il est à remarquer que dans les essais qui viennent d'être cités, nous avons fait croître uniformément de 0 à 1 la proportion de ciment contenue dans l'unité de poids des mélanges. Pour les mortiers qu'on emploie ordinairement sur les chantiers la variation est loin d'être aussi étendue, et l'on peut, vu l'indécision afférente à la détermination de la consistance normale, assimiler sans commettre une bien grande erreur la portion de courbe correspondant aux divers mortiers de la pratique à une droite qui, prolongée, passerait par le point correspondant au ciment pur.

On arrive alors à la loi suivante, déjà formulée par M. Alexandre à la suite d'expériences exécutées sur des mortiers dont les dosages variaient entre environ 150 et 600 kilogrammes de ciment par m^3 de sable, et que de notre côté nous avons vérifiée par de nombreux essais.

« La quantité d'eau nécessaire pour amener un mortier à avoir, après une durée déterminée de malaxage, une bonne consistance plastique, peut être considérée comme formée de deux parties, l'une proportionnelle au poids d'agglomérant, l'autre au poids de sable entrant dans la composition de ce mortier. »

Nous avons eu maintes occasions de vérifier que cette loi est très sensiblement exacte pour les mortiers de dosage moyen et même pour les mortiers riches; seuls les mortiers très maigres semblent s'en écarter, et exiger des quantités d'eau un peu supérieures à celles qu'elle fait prévoir. Encore ne faut-il pas oublier qu'il est bien difficile d'apprécier la consistance de pareils mortiers.

On trouvera quelques exemples à l'appui de la règle qui vient d'être énoncée dans le tableau ci-dessous qui indique les poids d'eau trouvés nécessaires pour gâcher 100 parties en poids de divers mortiers de richesse moyenne confectionnés avec un même ciment portland et différents sables.

NUMÉRO d'ordre du sable		POIDS DE CIMENT combinés à un poids 100 de sable								
		10	15	20	25	30	35	40	45	50
I	Proportion d'eau trouvée par l'expérience.	12,0	12,7	13,1	13,5	14,1	14,3	14,5	14,8	15,2
	24,0 % P _c + 11,0 % P _s .	12,2	12,6	13,1	13,5	13,9	14,3	14,6	14,9	15,2
	Différence.	-0,2	+0,1	0	0	+0,2	0	-0,1	-0,1	0
II	Proportion d'eau trouvée par l'expérience.	8,4	9,2	9,9	10,4	10,7	11,0	11,9	12,3	13,0
	24,0 % P _c + 7,0 % P _s .	8,6	9,2	9,9	10,4	10,9	11,4	11,9	12,3	12,7
	Différence.	-0,2	0	0	0	-0,2	-0,4	0	0	+0,3
III	Proportion d'eau trouvée par l'expérience.	8,3	8,8	9,4	9,8	10,2	10,8	11,4	12,0	12,6
	24,0 % P _c + 6,5 % P _s .	8,1	8,8	9,4	10,0	10,5	11,0	11,5	11,9	12,2
	Différence.	+0,2	0	0	-0,2	-0,3	-0,2	-0,1	+0,1	+0,3
IV	Proportion d'eau trouvée par l'expérience.	6,4	7,3	8,0	8,7	9,1	9,3	9,6	9,9	10,4
	24,0 % P _c + 4,5 % P _s .	6,3	7,1	7,7	8,4	9,0	9,5	10,1	10,6	11,0
	Différence.	+0,1	+0,2	+0,3	+0,3	+0,1	-0,2	-0,5	-0,7	-0,6

Influence de la composition granulométrique du sable.

— Nous avons déterminé de la même manière que dans les essais déjà cités les proportions d'eau nécessaires pour gâcher à consistance plastique des mortiers de même dosage (1 ciment + 3 sable en poids) confectionnés avec un même ciment et divers mélanges des trois sables quartzeux étalons G, M, F. Puis, inscrivant les nombres trouvés à côté des points représentatifs des divers mélanges sableux dans le triangle, nous avons déterminé les lignes de niveau de la surface topographique correspondante. Nous avons ainsi constaté que ces lignes n'étaient autres que des droites parallèles et équidistantes. Il en résulte que le poids d'eau nécessaire pour gâcher un mortier dosé à raison de 1 partie en poids de ciment pour 3 parties d'un mélange sableux de composition gra-

granulométrique G, M, F, est donné par une expression de la forme $\alpha g + \beta m + \gamma f + k$, k étant une constante qui, en vertu de la loi formulée plus haut, doit représenter la quantité d'eau exigée par le ciment.

Le tableau ci-dessous, qui relate les résultats obtenus pour un certain nombre de mélanges sableux, montre à quel point la concordance se trouve réalisée.

COMPOSITION DU MORTIER (EN POIDS)				PROPORTION D'EAU		ÉCART
Ciment	SABLE			trouvée directement par l'expérience	calculée à raison de 22,5 0/0 du cim. + 3,0 0/0 de G + 9,0 0/0 de M + 23,0 0/0 de F	
	G	M	F			
2	6	0	0	7,7	7,9	-0,2
2	0	6	0	12,3	12,4	+0,1
2	0	0	6	22,9	22,9	0
2	0	3	3	17,5	17,6	-0,1
2	3	0	3	15,3	15,4	+0,1
2	3	3	0	10,1	10,1	0
2	4	1	1	11,4	11,1	+0,3
2	1	4	1	13,6	13,4	+0,2
2	1	1	4	18,7	18,6	+0,1
2	2	2	2	13,7	14,4	-0,7

Nous avons vérifié la loi en confectionnant des mortiers dosés à raison d'une partie de ciment pour trois parties des 66 mélanges sableux définis par la *fig. 22* et les gâchant avec des quantités d'eau calculées d'avance au moyen des coefficients déduits de l'expérience préalable. Tous ont présenté une bonne consistance.

On peut donc dire que, pour tous les mortiers de même dosage faits avec des sables ne différant que par leur composition granulométrique, les proportions d'eau à employer pour le gâchage peuvent être décomposées en quatre parties respectivement proportionnelles aux poids du ciment et des trois sables G, M, F entrant dans la

composition du mortier, ou, ce qui revient au même, que la proportion d'eau nécessaire pour mouiller un mélange sableux quelconque, est la somme des proportions d'eau correspondant aux poids des trois sables élémentaires dont il est constitué.

Si l'on adopte pour les sables G, M et F les proportions 3,0 9,0, et 23,0 p. 100 trouvées plus haut, les proportions correspondant à tous les mélanges possibles de ces trois sables seront données par la surface topographique représentée par la *fig.* 24, surface qui n'est autre qu'un plan, ainsi que nous venons de le reconnaître.

Variation simultanée de la richesse des mortiers et de la composition granulométrique des sables. — Après avoir étudié successivement le cas de mortiers de richesse variable faits avec un même ciment et un même sable, et celui de mortiers au même dosage obtenus avec des sables de compositions granulométriques différentes, nous avons, dans de nouvelles expériences, fait varier simultanément la proportion et la grosseur du sable.

Dans ces conditions, si la loi formulée plus haut continue d'être applicable, le poids d'eau E nécessaire pour gâcher un mélange quelconque d'un même ciment et de trois sables élémentaires G, M, F devra satisfaire à une relation de la forme : $E = E_c P_c + E_g P_g + E_m P_m + E_f P_f$, dans laquelle $P_c P_g P_m P_f$ représenteront les poids des quatre éléments entrant dans le mélange, et $E_c E_g E_m E_f$ des constantes dépendant uniquement de la nature de ces matières.

Dès, lors les poids $P_c P_g P_m P_f$ étant connus, si l'on détermine expérimentalement pour chaque mortier la proportion d'eau la plus convenable, on aura entre les quatre constantes $E_c E_g E_m E_f$, autant d'équations de condition linéaires et du premier degré que de mortiers étudiés, et on pourra faire concourir toutes les expé-

riences à la détermination des valeurs les plus probables de ces paramètres.

Partant de là, nous avons admis pour un moment que la loi fut vraie et déterminé ces paramètres par la méthode des moindres carrés, puis nous avons substitué les valeurs trouvées dans les équations de condition et comparé les valeurs ainsi calculées pour E à celles que nous avons obtenues directement par l'expérience.

Une première série d'essais a porté sur 58 mortiers obtenus en mélangeant en diverses proportions un même ciment portland et trois sables calibrés G, M, F répondant à la définition donnée antérieurement et provenant de la mouture de quartzites de Cherbourg (*). Les dosages (en poids) adoptés ont été les suivants :

2 ciment + 8 sable.	15 mortiers
3 id. + 7 id.	15 id.
4 id. + 6 id.	10 id.
5 id. + 5 id.	10 id.
6 id. + 4 id.	4 id.
7 id. + 3 id.	3 id.
Ciment pur.	1 mortier.

58

L'application de la méthode des moindres carrés nous a conduit à la formule suivante, dont les coefficients sont les plus probables en vertu des données fournies par les expériences :

$$E = 25,67 \% P_o + 3,98 \% P_g + 8,32 \% P_m + 20,08 \% P_f.$$

En introduisant dans cette formule les valeurs de P_o, P_g, P_m, P_f correspondant à chacun des 58 mortiers étudiés, on obtient pour les poids d'eau nécessaires au gâchage

(*) Par suite d'une différence dans leur mode de broyage, ces trois sables n'avaient pas tout à fait la même composition granulométrique ni la même forme de grains que ceux ayant servi à l'expérience précédente et pour lesquels nous avons trouvé les coefficients 3,0, 9,0, 23,0.

de 100 parties de matière sèche des nombres dont trois seulement diffèrent de plus d'une unité de ceux trouvés par l'expérience.

L'erreur moyenne commise dans une expérience isolée sur ce poids d'eau est de $\pm 0,537$, d'où l'on conclut que l'approximation avec laquelle on connaît le coefficient de P_e est de $\pm 0,24$ p. 100, et celle de chacun des coefficients de P_g , P_m et P_n $\pm 0,29$ p. 100.

Les écarts se répartissent, quant à leurs signes, en 26 positifs, 10 nuls et 22 négatifs, et quant à leurs valeurs absolues comme l'indique le tableau ci-dessous :

LIMITES DES ÉCARTS en valeur absolue	NOMBRE D'ÉCARTS trouvé	NOMBRE THÉORIQUE s'il n'y a pas d'erreurs systématiques
De 0 à 0,2 p. 100.	21	16,8
De 0,2 à 0,4 id.	15	14,6
De 0,4 à 0,6 id.	8	11,3
De 0,6 à 0,8 id.	7	7,4
De 0,8 à 1,0 id.	4	4,3
Plus de 1,0 id.	3	3,6
	58	58,0

On voit qu'il y a à peu près concordance entre les nombres d'écarts de chaque grandeur et ceux qu'on déduit de la théorie des erreurs en partant de l'erreur moyenne $\pm 0,537$ quand on suppose qu'il n'intervient aucune cause perturbatrice.

Enfin la répartition des erreurs positives et négatives entre les diverses expériences ne paraît obéir à aucune loi.

Nous avons répété les mêmes essais avec un autre échantillon de ciment portland et des sables G, M, F obtenus en séparant en trois grosseurs, au moyen des tamis de 4, 36 et 324 mailles par centimètre carré, un sable

artificiel à grains aplatis provenant du concassage de coquillages marins.

L'équation la plus probable déduite des 58 mortiers a été :

$$E = 24,83 \% P_c + 4,69 \% P_g + 10,05 \% P_m + 18,18 \% P_f.$$

et l'erreur moyenne d'une expérience, $\pm 0,687$ p. 100.

On en déduit que l'approximation du coefficient de P_c est égale à $\pm 0,31$ p. 100, et celle de chacun des coefficients de P_g , P_m et P_f à $\pm 0,37$ p. 100.

Les écarts se répartissent en 30 positifs, 3 nuls et 25 négatifs, pouvant être groupés comme il suit d'après leurs valeurs absolues :

LIMITES DES ÉCARTS en valeur absolue	NOMBRE D'ÉCARTS trouvé	NOMBRE THÉORIQUE s'il n'y a pas d'erreurs systématiques
De 0 à 0,2 p. 100.	12	13,3
De 0,2 à 0,4 id.	13	12,2
De 0,4 à 0,6 id.	12	10,4
De 0,6 à 0,8 id.	6	8,0
De 0,8 à 1,0 id.	8	5,7
Plus de 1,0 id.	7	8,4
	58	58,0

La concordance est moins satisfaisante que pour les expériences précédentes; en outre, on constate que, parmi les 15 mortiers dosés à raison de 2 de ciment pour 8 de sable, 14 ont des écarts positifs, c'est-à-dire ont exigé pour être gâchés des quantités d'eau supérieures à celles qu'on déduit de la formule. Quant aux autres mortiers, leurs écarts sont indistinctement tantôt positifs et tantôt négatifs.

On peut conclure de ces deux séries d'expériences que la formule linéaire permet de calculer avec une approximation très suffisante les proportions d'eau correspon-

dant aux mortiers tant que ceux-ci ne sont pas trop maigres. Si la proportion du sable dépasse certaines limites, variables d'ailleurs suivant la nature de cette matière, la quantité d'eau donnée par la formule doit être un peu majorée.

On reconnaît en même temps que la quantité d'eau correspondant à chaque sable élémentaire pur, et qu'on peut considérer comme destinée à le mouiller, est d'autant plus forte que ce sable est plus fin et varie un peu suivant la nature et la forme de ses grains.

M. l'ingénieur en chef Alexandre a fait la même remarque et a donné, dans sa note des *Annales*, un calcul tendant à démontrer que la proportion d'eau nécessaire pour mouiller un poids donné de sable varie proportionnellement à la surface totale des grains contenus. Diverses expériences nous ont conduit à des conclusions un peu différentes.

D'ailleurs on constate que, si on décompose un sable naturel quelconque en un nombre assez considérable de sables divisionnaires, la proportion d'eau nécessaire pour gâcher le sable naturel est un peu plus faible que celles qu'on calculerait en déterminant d'abord celles qui correspondent aux divers sables divisionnaires considérés isolément.

On peut s'en rendre compte en gâchant séparément à consistance plastique plusieurs mortiers de même dosage où entrent respectivement des sables calibrés de grosseurs différentes, puis les mélangeant ensemble. La pâte obtenue est généralement trop molle.

Variations de consistance. — Étant donné une série de mortiers de consistance normale, on peut se demander comment on devra faire varier les proportions d'eau employées à les gâcher pour obtenir des mortiers ayant tous une même consistance différente de la première.

A la suite de diverses expériences dans lesquelles nous avons cherché soit à multiplier par un même facteur les coefficients relatifs aux sables G, M, F et au ciment, soit à ajouter ou à retrancher une même quantité d'eau à celle nécessaire pour gâcher à consistance normale un même poids de matière sèche, nous avons reconnu que la consistance variait pour tous les mortiers d'une manière à peu près analogue quand on ajoutait ou retranchait une même quantité d'eau à celle entrant dans *un même volume* de mortier gâché à consistance normale.

Règle adoptée pour les essais. — Sauf dans quelques cas spéciaux, tous les mortiers étudiés dans nos expériences ont été gâchés à la consistance plastique normale. A cet effet, et pour assurer la régularité des résultats, on a déterminé chaque fois, par des essais préalables, les coefficients relatifs au ciment et aux sables élémentaires employés, puis on a adopté pour le gâchage les proportions d'eau calculées par la formule linéaire établie ci-dessus. Presque toujours ces proportions ont donné la bonne consistance. Quand il n'en a pas été ainsi, on les a modifiées au juger de manière à l'obtenir.

Pour certaines expériences où l'on prévoyait de fréquents écarts à la règle générale, on a déterminé par des essais préalables les proportions d'eau correspondant à quelques-uns des mortiers à étudier et on en a induit par une interpolation graphique celles qui devaient convenir pour les autres.

V. — COMPACITÉ DES MORTIERS FRAIS.

Mesure de la compacité des mortiers frais. — La méthode que nous avons employée pour déterminer la com-

pacité des mortiers, et sur laquelle reposent la plupart de nos expériences, a pour point de départ le calcul suivant :

Mélangions un poids C de ciment avec un poids S de sable, et gâchons le tout avec un poids E d'eau. Après malaxage prolongé, introduisons une partie de la pâte dans une mesure jaugée de volume V , dérasons la soigneusement et pesons-la. Soit P son poids.

Il est facile de calculer que les poids de ciment, de sable et d'eau contenus dans l'unité de volume du mortier sont respectivement :

$$C' = \frac{P}{V} \frac{C}{C + S + E},$$

$$S' = \frac{P}{V} \frac{S}{C + S + E},$$

$$E' = \frac{P}{V} \frac{E}{C + S + E}.$$

Or, pendant les premiers temps du gâchage et du durcissement, le ciment n'éprouve de la part de l'eau qui a servi à le mouiller qu'une attaque toute superficielle qui n'altère que très faiblement le volume de chacun de ses grains. On peut d'ailleurs mesurer exactement son volume réel en déterminant par la méthode du flacon le poids spécifique du ciment en poudre dans l'eau. Pendant cette opération, il est nécessaire d'agiter souvent la matière pour éviter qu'elle se prenne en masse et en même temps de la soumettre à l'action du vide, de manière à chasser toutes les bulles d'air interposées entre ses grains. On constate ainsi que le poids spécifique dans l'eau des bons ciments portland est d'environ 3,10 en moyenne, c'est-à-dire sensiblement le même que leur poids spécifique réel, tel qu'on peut le déterminer au moyen de la benzine ou de tout autre liquide n'exerçant sur eux aucune action.

Si donc on appelle δ , d et ϵ les poids spécifiques du

ciment, du sable et de l'eau employés, les volumes réellement occupés par ces trois éléments dans l'unité de volume du mortier frais considéré seront :

$$c = \frac{C'}{\delta}, \quad s = \frac{S'}{d}, \quad e = \frac{E'}{\varepsilon},$$

et le volume des vides v se calculera par différence :

$$v = 1 - (c + s + e).$$

Ces quatre volumes c , s , e , v , dont la somme est constamment égale à l'unité, caractérisent la compacité d'un mortier frais, et l'on conçoit que l'étude de leurs variations suivant les conditions de fabrication des mortiers, devra fournir des renseignements utiles sur la meilleure composition qu'il conviendra de rechercher pour ces derniers. En particulier, la somme $c + s$ représentant la fraction du volume du mortier occupée par la matière solide qui en constitue le squelette, devra avoir une grande importance et ne jamais être perdue de vue.

Influence de la richesse des mortiers. — Cherchons d'abord comment, pour tous les mortiers de consistance normale fabriqués avec un même sable et un même ciment, les divers volumes c , s , e , v dépendent des proportions dans lesquelles les deux matières sont mélangées entre elles.

Pour nous rendre un compte plus exact de leurs variations, prenons pour abscisses sur une base de longueur 1, dont les deux extrémités correspondront l'une au sable pur, l'autre au ciment pur, des longueurs égales aux proportions pondérales de ciment entrant dans l'unité de poids de mélange sec, et portons en ordonnées les valeurs des divers volumes que nous voulons étudier. En joignant par un trait continu les différents points correspondant à une même variable, nous obtiendrons une courbe donnant la solution du problème proposé.

La *fig. 17* a été obtenue de cette manière et corres-

pond à tous les mortiers qu'on peut faire avec un même ciment portland et deux sables représentés par les points P et Q de la *fig.* 12, le premier (traits pleins) un peu coquillier, provenant des environs de Boulogne ($g = 0,143$, $m = 0,332$, $f = 0,525$), le second (traits pointillés) granitique, à grands ronds et provenant des environs de Cherbourg ($g = 0,731$, $m = 0,246$, $f = 0,023$).

De pareils diagrammes ont l'avantage de correspondre à la série complète de tous les dosages qu'on peut réaliser avec un ciment et un sable déterminés. Si l'on désire s'en tenir aux dosages ordinairement adoptés dans la pratique des chantiers, il sera commode de prendre pour abscisses les poids de ciment ajoutés à 1 mètre cube de sable.

La *fig.* 18 a été obtenue de cette manière; elle correspond à la fois au sable P (traits pleins) et au sable Q (traits pointillés) et a été déduite de la précédente en adoptant pour le mètre cube de ces deux sables à l'état sec les poids 1.535 kilogrammes et 1.668 kilogrammes déterminés par l'expérience.

En construisant pour un grand nombre de sables naturels ou artificiels des diagrammes analogues à ceux qui sont représentés par la *fig.* 17, nous avons constaté les lois suivantes :

Quand on fait croître uniformément de 0 à 1 la proportion de ciment entrant dans l'unité de poids de mélange sec :

1° L'augmentation du volume réel de ciment entrant dans l'unité de volume du mortier (c) est plus ou moins rapide suivant la grosseur du sable et la richesse des mortiers.

2° Il en est de même de la diminution du volume réel du sable contenu (s).

3° Le volume d'eau (e) contenu dans l'unité de volume du mortier frais va en croissant.

4° Le volume total des vides décroît rapidement d'abord, puis plus lentement. Parfois, il passe par un minimum voisin de zéro (voir courbes cotées $c + s + e$).

5° Le volume plein réel total ($c + s$) des matières solides contenues dans l'unité de volume du mortier peut, suivant les sables, soit décroître d'une manière continue (sable P), soit commencer par croître, puis décroître après être passé par un maximum (sable Q). Si l'on considère seulement les mortiers aux dosages ordinaires, ce volume peut, quand leur richesse augmente, soit croître sans interruption, soit au contraire aller toujours en décroissant, soit enfin croître d'abord, passer par un maximum et décroître ensuite (voir *fig.* 18).

6° Il en est de même en ce qui concerne le poids de l'unité de volume de mortier frais.

7° Le volume de mortier frais fourni par un 1 mètre cube de sable (rendement) croît avec une allure variable suivant la composition du mélange.

Quant aux valeurs absolues des divers volumes ou poids dont il vient d'être question, elles oscillent, selon le sable employé, entre des limites très écartées.

En somme, il ressort des expériences précitées que les modifications qu'éprouve la compacité des mortiers quand on fait varier leur dosage, peuvent obéir à des lois très différentes suivant le sable dont on se sert et ne sauraient être définies et prévues par une formule générale dans laquelle on ne tiendrait pas compte de la nature du sable employé.

Nous verrons un peu plus loin qu'au contraire, quand on fait intervenir la notion de composition granulométrique des sables, les diverses observations citées ci-dessus, qui dans bien des cas peuvent sembler contradictoires, apparaissent comme les conséquences d'une loi générale commune que met bien en évidence le mode de représentation graphique que nous avons adopté.

Mais auparavant et pour continuer à procéder du simple au composé, nous allons étudier le cas de mortiers de même dosage faits avec des sables de compositions granulométriques différentes.

Influence de la composition granulométrique du sable.

— On a confectionné avec un même échantillon de ciment portland et 66 mélanges différents des trois sables quartzeux G, M, F des mortiers dosés à raison d'une partie en poids de ciment pour trois de sable. Les proportions d'eau de gâchage, déterminées par une expérience préalable (voir plus haut), ont été calculés par la formule :

$$E = 23,5 \% P_c + 3,0 \% P_g + 9,0 \% P_m + 23,0 \% P_f.$$

Du poids d'un volume connu des pâtes obtenues, on a déduit suivant la règle exposée plus haut les divers éléments entrant dans l'unité de volume de chaque mortier.

La *fig. 30* montre comment varie le poids du litre de mortier frais. On voit que, minimum pour les sables G, M, F purs, ce poids augmente à mesure que leurs mélanges deviennent plus complexes et atteint son maximum pour un mélange sableux dont la composition granulométrique est voisine de $0,78 G + 0 M + 0,22 F$.

La *fig. 31* donne les volumes d'eau contenus par litre de mortier frais. Comme on devait le prévoir, ces volumes croissent à mesure que le sable devient plus fin. Les lignes de niveau sont à peu de chose près des droites parallèles inégalement espacées.

La *fig. 32* montre que les volumes réels de matière solide ($c + s$) entrant dans l'unité de volume de mortier varient suivant une loi analogue à celle des poids du litre. Les courbes ont à peu près la même allure et le maximum, égal à 0,734 environ, se trouve encore sur le côté G F et correspond à la composition granulométrique $0,80 G + 0 M + 0,20 F$.

Comme tous les mortiers étudiés contiennent la même

proportion pondérale de sable et de ciment, la même figure donne la loi de variation de la quantité de ciment entrant dans l'unité de volume de mortier, de même que celle du sable. Il suffit de charger les cotes. Les poids spécifiques du ciment et du sable étant 3,10 et 2,65, les coefficients par lesquels il convient de multiplier les cotes de la *fig.* 32 sont les suivants :

Pour obtenir le volume réel c de ciment par unité de volume de mortier, multiplier $c + s$ par.	0,222
Pour obtenir le volume réel s de sable par unité de volume de mortier, multiplier $c + s$ par.	0,778
Pour obtenir le poids de ciment par litre de mortier, multiplier $c + s$ par.	0 ^{ks} ,687
Pour obtenir le poids de sable par litre de mortier, multiplier $c + s$ par.	2 ^{ks} ,062

Enfin, la *fig.* 33 indique les volumes pleins réels par unité de volume de mortier frais, ou, en prenant les compléments à 1 des cotes qui y sont inscrites, les volumes des vides restant dans les mortiers. On voit que ces vides, considérables pour les mortiers aux sables G et M purs, se trouvent rapidement diminués par l'introduction d'un peu de sable F, et arrivent, dès que la proportion de ce sable atteint environ 0,20 du mélange sableux total, à ne pas excéder 0,050 du volume apparent du mortier. En même temps on constate que les vides ne peuvent être complètement supprimés, et que leur volume total atteint toujours au minimum 3 p. 100 du volume apparent du mortier ($c + s + e \leq 0,970$).

Toutefois il ne faut pas oublier qu'il s'agit là de mortiers considérés à l'état frais dont la contexture intime variera dès qu'une partie de leur eau se sera combinée au ciment et qu'une autre partie de cette eau se sera évaporée. Au contraire, si l'on admet qu'en durcissant, le mortier conserve son volume extérieur, condition qu'on exige des bons ciments, le volume réel total des matières solides qui en forment la charpente restera sensiblement

le même (*), de sorte qu'on pourra considérer comme définitives les indications de la *fig.* 32.

En répétant les mêmes expériences avec d'autres échantillons de ciment et des sables G, M, F différents des premiers, on observe que, si les valeurs absolues des divers volumes étudiés varient un peu, la forme générale des courbes de niveau reste la même et les maxima se trouvent à peine déplacés.

Enfin, si l'on étudie de la même manière l'influence de la composition granulométrique du sable sur des mortiers à d'autres dosages, on constate que les diagrammes se modifient et que notamment, dans celui qui donne les valeurs de $c + s$, la ligne de crête de la surface topographique, ligne qui, pour les mortiers dosés à raison de 1 de ciment pour 3 de sable, correspond à peu près à la droite $f = 0,2$, se rapproche d'autant plus du côté GM du triangle que les mortiers considérés sont plus riches en ciment. En même temps, le sommet de la surface, toujours situé sur le côté GF du triangle, se rapproche du point G et arrive à l'atteindre quand le poids du ciment entrant dans le mortier est d'environ les $2/3$ de celui du sable.

Pour les mortiers infiniment maigres, le sommet tend vers un point situé à peu près aux $4/10$ de la distance GF.

Généralisation. — On conçoit qu'en établissant comme nous venons de faire pour le mortier 1/3 un grand nombre de diagrammes correspondant à des dosages suffisamment voisins, on pourrait se rendre compte de la manière dont la compacité des mortiers se trouve modifiée quand on fait varier à la fois leur richesse et la composition gra-

(*) En réalité une petite partie du ciment sera dissoute par l'eau et d'autre part une partie de l'eau entrera en combinaison avec le ciment et par ce fait se trouvera solidifiée.

nulométrique du sable. Mais ce serait là un procédé bien long et peu commode.

On pourrait encore, par une construction analogue à celle que nous employons pour étudier l'influence de la composition granulométrique seule, représenter les divers mortiers par des points répartis à l'intérieur et sur les faces d'un tétraèdre régulier dont les sommets correspondraient aux trois sables G, M, F et au ciment pur. Les lieux géométriques des points représentatifs de tous les mortiers jouissant à un même degré d'une propriété quelconque seraient alors des surfaces de niveau dont on pourrait déterminer les traces sur les faces du tétraèdre et sur des plans auxiliaires et dont l'allure caractériserait la loi de variation de la propriété étudiée. Malheureusement un pareil mode de représentation serait d'une application peu pratique qui ferait disparaître en grande partie les avantages qu'offre généralement l'emploi des méthodes graphiques.

Nous avons tourné la difficulté, au moins pour l'étude de quelques propriétés des mortiers, en nous contentant d'une approximation assez grossière, suffisante néanmoins pour donner une idée très nette de la loi générale qu'il s'agissait d'établir.

Nous avons admis plus haut qu'au moment où l'on détermine le poids d'un volume connu d'un mortier frais, le ciment contenu n'a subi de la part de l'eau qu'une modification tout à fait négligeable. S'il en est ainsi, il est probable qu'en remplaçant dans la composition d'un mortier donné des grains de ciment par autant de grains de sable qui leur soient égaux, on ne modifiera en rien la répartition et les volumes relatifs des vides et des pleins dans ce mortier.

Or il est à remarquer qu'au point de vue de la grosseur de ses grains et de la proportion d'eau qu'il exige pour le gâchage, le ciment correspond à peu près au

sable F. Partant de là, on peut se demander si la compacité du mortier ne restera pas sensiblement la même quand on remplacera une partie ou même la totalité du sable F qu'il contient par un égal volume absolu de ciment ou réciproquement (*).

Pour rechercher dans quelle mesure on pouvait admettre qu'il en fut ainsi, nous avons comparé la compacité de séries de mortiers pour chacune desquelles, les quantités de sables G et M restant toujours les mêmes, nous faisons varier les proportions du sable F et du ciment de telle sorte que la somme des volumes absolus de ces deux matières restât constante.

Le tableau ci-dessous, qu'il est facile de traduire en courbes continues en prenant pour abscisses les proportions de sable F substituées au ciment dans chaque mortier (*fig. 13*), donne les nombres trouvés pour les sommes $c + s$ et $c + s + e$ dans trois séries de mortiers différentes.

SÉRIE	PROPORTIONS EN VOLUMES ABSOLUS				$c + s$	$c + s + e$
	Sable G	Sable M	Sable F	Ciment		
H	0,500	0	0	0,500	0,689	0,967
	0,500	0	0,125	0,375	0,697	0,967
	0,500	0	0,250	0,250	0,708	0,970
	0,500	0	0,375	0,125	0,713	0,967
	0,500	0	0,500	0	0,722	0,970
J	0,2	0,2	0	0,6	0,637	0,934
	0,2	0,2	0,1	0,5	0,645	0,959
	0,2	0,2	0,2	0,4	0,648	0,956
	0,2	0,2	0,3	0,3	0,656	0,959
	0,2	0,2	0,4	0,2	0,661	0,959
	0,2	0,2	0,5	0,1	0,664	0,954
	0,2	0,2	0,6	0	0,675	0,962
K	0,2	0,5	0	0,3	0,689	0,932
	0,2	0,5	0,1	0,2	0,691	0,926
	0,2	0,5	0,2	0,1	0,683	0,907
	0,2	0,5	0,3	0	0,681	0,896

(*) Les deux matières n'ayant pas même poids spécifique, on n'obtiendrait pas le résultat cherché si l'on se contentait de remplacer un poids de l'une par un même poids de l'autre.

Il montre que la substitution ne fait subir aux volumes étudiés que de faibles variations, dont on peut d'ailleurs s'expliquer facilement la cause.

En effet, dans chacune des trois séries continues de mortiers, il existe un mélange où les poids de ciment et de sable sont dans le rapport de 1 à 3, et qui, par suite, est représenté par un point des *fig.* 32 et 33. Les points désignés par les lettres H, J, K dans ces figures correspondent à ces mortiers (*).

Or, si l'on remarque que les grains dont se compose le sable F sont en réalité un peu plus gros que ceux du ciment, le remplacement d'un volume absolu infiniment faible de ciment par un égal volume absolu de sable F dans les trois mortiers considérés devra vraisemblablement produire une variation de compacité de même sens que si, les proportions de ciment et de sable restant constantes, on augmentait infiniment peu la grosseur du sable. S'il en est ainsi, les sommes $c + s$ et $c + s + e$ devront donc être croissantes ou décroissantes suivant

(*) Les poids spécifiques du ciment et du sable étant 3,10 et 2,65, si on appelle x le volume absolu de ciment contenu dans l'unité de volume absolu du mélange sec, les poids de ciment et de sable seront respectivement $3,10 x$ et $2,65 (1 - x)$ et pour le mortier cherché on aura $2,65 (1 - x) = 3 \times 3,10 x$, et par suite $x = 0,222$. Dès lors la composition des mélanges correspondant au dosage de 1/3 en poids sera donnée par le tableau suivant qui permet de déterminer leurs points représentatifs.

SÉRIE	PROPORTIONS en volumes absolus				COMPOSITION GRANULOMÉTRIQUE du sable		
	G	M	F	Ciment	$g =$	$m =$	$f =$
H	0,500	0	0,278	0,222	$\frac{0,500}{0,778} = 0,642$	0	$\frac{0,278}{0,778} = 0,358$
J	0,200	0,200	0,378	0,222	$\frac{0,200}{0,778} = 0,257$	$\frac{0,200}{0,778} = 0,257$	$\frac{0,378}{0,778} = 0,486$
K	0,200	0,500	0,078	0,222	$\frac{0,200}{0,778} = 0,257$	$\frac{0,500}{0,778} = 0,642$	$\frac{0,078}{0,778} = 0,101$

qu'un déplacement infiniment petit des points H, J, K tendant à les éloigner du sommet F, leur fera monter ou descendre la pente des surfaces topographiques.

Or, on constate précisément en se reportant à la *fig. 32* que les points H et J montent la côte en s'éloignant du point F, tandis que K la descend, ce qui correspond parfaitement aux augmentations trouvées expérimentalement pour $c + s$ dans les séries H et J quand on remplace le ciment par du sable F, et à la décroissance de la même somme pour la série K.

De même, dans la *fig. 33* les points H et J restent sur le plateau, tandis que le point K descend une pente assez rapide, alors que les expériences ont montré que par la substitution du sable F au ciment, les sommes $c + s + e$ restaient sensiblement constantes pour les deux premières séries de mortiers et décroissaient bien nettement pour la troisième.

Les anomalies apparentes observées viennent donc confirmer notre hypothèse, en montrant qu'au point de vue de la compacité initiale des mortiers, les grains de ciment jouent sensiblement le même rôle que des grains égaux de sable. En outre, la faiblesse des écarts que l'on constate quand on remplace l'un par l'autre le ciment et le sable F permet dans une certaine mesure d'assimiler ces deux matières entre elles et d'envisager les mortiers au point de vue de la composition granulométrique des matières sèches totales qu'ils contiennent, les proportions des grains de chaque grosseur étant évaluées en volumes absolus.

A fortiori, la nature du ciment employé doit exercer peu d'influence sur la compacité du mortier. C'est ce que nous avons vérifié par l'expérience.

Nous distinguerons donc dans un mortier trois catégories de grains G, M, F' séparés par les mêmes tamis que précédemment, et dont les deux premières seront

constituées exclusivement de grains de sable, tandis que la troisième comprendra à la fois le sable F et le ciment. Les erreurs commises ainsi seront sensiblement du même ordre de grandeur que les écarts résultant pour les diagrammes 24, 30, 31, 32 et 33 de variations dans la forme et la nature des grains du sable employé, ainsi que dans la composition granulométrique de chacun des sables élémentaires G, M, F.

Variation de la compacité des mortiers suivant leur composition granulométrique. — Partant de ce principe, nous avons construit les deux diagrammes représentés par les *fig.* 34 et 35 en nous servant des résultats fournis déjà par les mortiers au dosage $1/3$ pour lesquels F' n'est jamais inférieur à 0,222, ainsi que de nouveaux essais faits avec des mortiers plus maigres, ou même, pour déterminer les points du côté GM des triangles, avec de simples mélanges des sables G et M gâchés comme des mortiers avec les proportions d'eau calculées comme il a été expliqué plus haut.

La *fig.* 34, qui correspond aux variations de $c + s$, montre que cette somme, minimum pour les sommets du triangle, atteint son maximum d'environ 0,734 pour les mortiers de composition granulométrique $g = 0,6$, $m = 0$, $f' = 0,4$ (point N du diagramme).

La *fig.* 35 donne les valeurs de la somme $c + s + e$. Elle permet de constater que le volume plein réel, très faible pour le sommet G et le côté GM, croît rapidement quand la proportion de F' augmente et arrive, quand cette proportion atteint environ 0,35, à ne plus différer de l'unité que d'environ 0,050. La surface topographique se termine par une sorte de plateau dont le point culminant est situé dans le voisinage du milieu du côté GF'.

Divers problèmes vont nous montrer le parti qu'on peut tirer de ces deux diagrammes.

1^{er} *Problème*. — Déterminer la compacité d'un mortier dosé à raison de C kilogrammes de ciment et S kilogrammes d'un sable de poids spécifique d et de composition granulométrique g, m, f ($g + m + f = 1$). On ramènerait à ce problème le cas où on indiquerait le poids de ciment employé par mètre cube de sable, en déterminant expérimentalement le poids du sable entrant dans un mètre cube.

Soit δ le poids spécifique du ciment dans l'eau;

C kilogr. de ciment ont pour volume absolu $\frac{C}{\delta}$;

S kilogr. de sable ont pour volume absolu $\frac{S}{d}$,

se décomposant en $\frac{Sg}{d}$, $\frac{Sm}{d}$ et $\frac{Sf}{d}$.

Les proportions de G, M et F' entrant dans le mélange seront donc :

$$\text{pour G, } \frac{\left(\frac{Sg}{d}\right)}{\left(\frac{C}{\delta} + \frac{S}{d}\right)}; \text{ pour M, } \frac{\left(\frac{Sm}{d}\right)}{\left(\frac{C}{\delta} + \frac{S}{d}\right)}; \text{ et pour F', } \frac{\left(\frac{Sf}{d} + \frac{C}{\delta}\right)}{\left(\frac{C}{\delta} + \frac{S}{d}\right)}.$$

Dès lors il suffira, pour connaître les valeurs de $c + s$ et de $c + s + e$ relatives à ce mortier, de déterminer dans les triangles des *fig. 34* et *35* le point représentatif de cette composition granulométrique et de lire les cotes correspondantes. Si V et V' sont ces cotes, on aura pour calculer les quatre volumes c, s, e et v qui définissent la compacité du mortier, les quatre équations suivantes :

$$\begin{aligned} c + s + e + v &= 1, \\ c + s &= V, \\ c + s + e &= V', \\ \frac{c}{s} &= \frac{\left(\frac{C}{\delta}\right)}{\left(\frac{S}{d}\right)}. \end{aligned}$$

Il y a lieu de remarquer que le poids C de ciment a

même volume absolu qu'un poids $C' = \frac{d}{\delta} C$ de sable, de sorte que le mélange d'un poids S de sable et d'un poids C de ciment aura même composition granulométrique que celui d'un poids S de sable avec un poids C' de sable fin et sera représenté par un point P de la droite joignant le point représentatif A du sable considéré au sommet F' du triangle. La position exacte du point P sera d'ailleurs définie par l'égalité : $\frac{AP}{PF'} = \frac{C'}{S}$.

2^e *Problème*. — Déterminer comment varie la compacité de tous les mortiers à dosages différents qu'on peut obtenir avec un même ciment et un même sable de composition granulométrique connue.

Il résulte de la remarque qui précède que le lieu géométrique des points représentatifs de ces mortiers ne sera autre que la droite AF' . On aura donc la représentation graphique de leurs compacités en déterminant la section des surfaces topographiques représentées par les *fig. 34* et *35* par un plan vertical ayant pour trace la droite AF' .

On obtiendra ainsi des courbes analogues aux courbes donnant $c + s$ et $c + s + e$ dans la *fig. 17*, avec cette différence que, la longueur AF' étant prise pour unité, les abscisses seront égales aux volumes absolus de ciment entrant dans un volume absolu 1 de mélange sec. Pour en déduire les proportions en poids, il suffira de multiplier les volumes absolus par les poids spécifiques δ et d .

L'examen de la *fig. 35* montre que, quand on considérera des mortiers de plus en plus riches, le volume plein réel de matières humides contenues dans l'unité de volume de mortier frais commencera par être d'autant plus faible que le sable considéré contiendra moins de grains F , puis ira en augmentant jusqu'à ce que le mortier

atteigne une certaine richesse en ciment, à partir de laquelle $c + s + e$ se maintiendra d'une manière à peu près constante à une valeur assez élevée. Plus le sable contiendra de grains F , moins il sera nécessaire de lui incorporer de ciment pour arriver à ce résultat.

Quant aux variations de la somme $c + s$ des volumes absolus de matière solide entrant dans un volume 1 de mortier, elles obéiront à une loi plus complexe.

Pour nous en rendre compte, déterminons sur la *fig. 34* la courbe $N\alpha N'$ lieu géométrique des points de contact des tangentes menées du point F' à toutes les lignes de niveau qu'on peut supposer tracées sur la surface topographique. Au point α intersection de cette courbe et de la droite AF' correspondra un maximum de la courbe section de la surface par le plan vertical AF' . Par suite, tant que le rapport du poids de ciment au poids de sable res-

tera inférieur à $\frac{\delta \times A\alpha}{d \times \alpha F'}$, la somme $c + s$ croîtra en même temps que la richesse du mortier ; pour cette valeur elle passera par un maximum, puis elle ira en décroissant à mesure que la richesse du mortier dépassera de plus en plus celle qui correspond à ce dosage.

Or la courbe $N\alpha N'$ diffère peu de la droite $f' = 1/3$ parallèle au côté GM et passant par le centre de gravité du triangle. D'autre part on voit sur la figure que les cotes de ses points augmentent de N' vers N . On peut donc formuler les lois suivantes :

1° Parmi tous les mortiers de consistance normale qu'on peut obtenir avec un sable déterminé, celui qui par unité de volume contient la plus grande proportion de matières solides est celui dans lequel le volume absolu des grains fins, ciment compris, est égal à la moitié du volume absolu des gros grains et des grains moyens réunis.

2° Cette proportion maximum de matières solides est d'autant plus forte que le rapport de la proportion des

gros grains à celle des grains moyens est lui-même plus considérable.

Enfin on remarquera que la courbe NaN' permet de classer tous les sables en deux catégories :

Pour tous ceux dont le point représentatif se trouve dans la portion GNM du triangle $(f < \frac{1}{3})$, il existe une proportion de ciment correspondant à un maximum de $c + s$; tel est le cas du sable Q étudié plus haut (*fig. 17*).

Au contraire, pour tous ceux de la région $NN'F$ $(f > \frac{1}{3})$, le volume plein solide décroît d'une manière continue en même temps que la richesse du mortier augmente. C'est ce que nous a déjà montré la *fig. 17* en ce qui concerne le sable P employé à Boulogne. Avec de pareils sables il peut donc dans une certaine mesure y avoir intérêt à ne pas faire de mortiers trop riches.

La *fig. 36*, sur laquelle sont tracées deux séries de lignes de niveau, donne d'une part la valeur maximum de $c + s$ qu'on peut obtenir avec chaque sable (traits pointillés) et d'autre part le dosage en ciment correspondant à ce maximum (traits pleins). Pour en faciliter la lecture, nous avons évalué ces dosages en poids de ciment par mètre cube de sable, calculant les poids du mètre cube d'après les données de la *fig. 23*.

Comme vérification des *fig. 34* et *35*, nous avons déterminé directement la compacité d'un certain nombre de mortiers à divers dosages d'un même ciment et d'un même mélange des trois sables quartzeux étalons $(0,5G + 0,2M + 0,3F)$ représenté par le point B de ces figures, puis nous avons comparé les résultats obtenus ainsi avec ceux qu'on déduit des diagrammes *34* et *35*.

La *fig. 13*, qui représente les uns et les autres, montre que l'écart n'est pas bien considérable. Il le serait davantage si les grains du sable employé différaient notable-

ment quant à leur nature ou à leur forme de ceux des sables quartzeux étalons.

Étude d'une fonction quelconque des volumes c, s, e, v .
Certes, l'élément $c + s$ doit être un facteur important de la qualité des mortiers et il est naturel qu'on cherche à lui donner la plus forte valeur possible. Pourtant il est évident qu'il n'est pas le seul à considérer, et qu'on ne saurait par exemple l'augmenter impunément si de cette augmentation devrait résulter une notable diminution de l'élément c . A quelle limite conviendra-t-il de s'arrêter et quelle fonction des quatre éléments c, s, e, v devra-t-on considérer comme le critérium d'un bon mortier, en supposant bien entendu que la qualité du ciment employé reste invariable?

C'est là une question à laquelle il est impossible de répondre, car elle comporte une infinité de solutions suivant les conditions particulières dans lesquelles chaque mortier est appelé à travailler.

A tel mortier on demandera avant tout l'adhérence aux matériaux qu'il a mission de relier entre eux; de tel autre, on exigera une très grande résistance à certains agents mécaniques, comme c'est par exemple le cas pour les revêtements d'ouvrages militaires appelés à soutenir le choc violent de projectiles; pour tel autre au contraire la résistance mécanique n'aura qu'une importance toute secondaire tandis qu'il sera nécessaire qu'il soit en état de subir sans s'altérer le contact d'éléments capables d'exercer sur lui une action chimique décomposante. Tel est le cas des mortiers exposés à l'eau de mer, pour lesquels il n'est pas d'ennemi plus redoutable que le sulfate de magnésie que cette eau contient en dissolution.

Presque toujours d'ailleurs la résistance mécanique et la résistance chimique seront à la fois mais inégalement nécessaires et devront entrer en ligne de compte à des

degrés variables dans la détermination de la composition la plus convenable. Enfin à côté de ces considérations d'ordre technique viendra se placer la question du prix de revient qui, suivant l'importance de l'ouvrage, exercera aussi une influence variable sur le choix du dosage à adopter.

En tout cas, quel que soit l'ensemble des conditions qu'on se propose de réaliser, le problème à résoudre pourra être ramené à la détermination du maximum ou du minimum d'une certaine fonction qui, ainsi que nous venons de le reconnaître, sera généralement très complexe et pour ainsi dire impossible à mettre en équation, mais dont l'existence ne saurait, croyons-nous, être mise en doute.

Il nous semble d'ailleurs à peu près certain qu'on pourra toujours considérer cette fonction comme ne dépendant que des quatre volumes élémentaires c, s, e, v , car, si l'on ne perd pas de vue que nous nous supposons toujours en présence d'un même ciment et d'un sable chimiquement inerte, la suite des transformations moléculaires que subira à la longue un mortier exposé *dans des conditions bien déterminées*, ne pourra dépendre que des proportions et de la répartition initiale des matières dont il était constitué au moment de son emploi.

Dès lors, si l'on arrive à représenter cette fonction par une formule algébrique, $f(c, s, e, v)$, les diagrammes des *fig. 34* et *35* permettront de résoudre complètement le problème du meilleur dosage à adopter pour chaque composition granulométrique de sable. En effet, quand à un sable de composition granulométrique connue on aura combiné une proportion connue de ciment, on pourra déterminer les quatre éléments fondamentaux c, s, e, v du mortier, car on connaîtra quatre fonctions distinctes de ces paramètres, savoir leur somme qui est constamment égale à l'unité, le rapport $\frac{c}{s}$ et enfin les deux sommes.

$c + s$ et $c + s + e$ données par les diagrammes 34 et 35. On pourra donc calculer la valeur de la fonction f pour le dosage considéré et chercher comment elle varie suivant la proportion de ciment combinée au sable.

Il sera alors facile d'attribuer comme cotes au point représentatif de chaque sable la valeur maximum que peut prendre la fonction f pour tous les mortiers faits avec ce sable et la proportion de ciment correspondant à ce maximum. La représentation des deux surfaces topographiques, lieux de ces points, conduira à un diagramme double analogue à celui de la *fig.* 36 et qui donnera la solution du problème pour tous les cas qui pourront se présenter.

Nous relaterons dans la suite de ce mémoire les résultats de diverses expériences exécutées en vue de rechercher dans quelle mesure certaines qualités des mortiers (compacité après séchage, porosité, perméabilité, résistance, décomposition par l'eau de mer) dépendent de la compacité initiale. Toutefois nous n'abandonnerons pas l'étude spéciale des mortiers frais avant d'avoir exposé les quelques données que nous avons pu réunir au sujet d'une question que jusqu'à présent nous avons à dessein laissée de côté, celle de savoir comment varient les éléments c, s, e, v quand on modifie la quantité d'eau employée pour le gâchage d'un même mélange de ciment et de sable.

Variation de la compacité de mortiers frais suivant la proportion d'eau employée pour le gâchage. — La détermination de la compacité de mortiers de même dosage gâchés avec des proportions d'eau différentes ne laisse pas que de présenter certaines difficultés. Tant que sa consistance diffère peu de la consistance plastique normale, la pâte se tasse toujours sensiblement de la même manière et les poids trouvés pour un même volume d'un même mortier dans plusieurs expériences successives

n'offrent généralement que des différences insignifiantes. Mais il n'en est plus de même avec des mortiers trop mous ou trop secs. Pour les premiers, une partie de l'eau tend à s'échapper en détruisant l'homogénéité du mélange, de sorte qu'il peut y avoir erreur sur la composition de la pâte mesurée. En même temps il se produit dans la mesure, surtout si l'on cherche à tasser la matière en lui imprimant quelques trépidations, une séparation partielle des gros grains qui descendent et de l'eau qui remonte à la surface. Quant aux mortiers un peu secs, leur tassement peut varier beaucoup suivant la manière dont on opère.

Les expériences ne comportent donc pas une très grande précision, au moins en ce qui concerne les extrémités de chaque série de mortiers. Néanmoins elles nous ont permis d'entrevoir la loi cherchée.

Nous avons d'abord constaté que, de même que pour l'étude des variations de $c + s$, on pouvait, sans guère modifier les résultats, remplacer l'un par l'autre dans les mortiers des volumes absolus égaux de ciment et de sable fin. Dès lors, il nous a suffi de faire varier la composition granulométrique des mortiers sans nous occuper de leur richesse en ciment et d'étudier pour un certain nombre de compositions granulométriques la variation des volumes élémentaires c, s, e, v suivant les quantités d'eau employées pour le gâchage.

La *fig. 4*, qui reproduit graphiquement les résultats d'un certain nombre d'expériences, a été obtenue en représentant la compacité de chaque mortier par un point ayant pour abscisse la valeur de e et pour ordonnée celle de la somme $c + s$ correspondante, et joignant par une ligne continue les points relatifs à tous les mortiers obtenus en gâchant un même mélange avec des proportions d'eau variables. Il résulte de ce mode de construction et de relation $c + s + e + v = 1$ que le volume des vides

restant dans l'unité de volume de chaque mortier est proportionnel à la distance de son point représentatif à la droite LL' qui a pour équation $(c + s) + e = 1$.

On voit par cette figure que, lorsque la proportion d'eau augmente, le volume réel de matières solides contenu dans l'unité de volume de mortier commence généralement par augmenter, puis passe par un maximum et décroît ensuite d'une manière bien régulière. On constate en outre qu'en général le point correspondant à la bonne consistance plastique (traits tracés en travers des courbes sur la figure) est situé un peu après le maximum de $c + s$.

Il semble donc que pratiquement il pourra y avoir certains avantages à gâcher les mortiers avec des proportions d'eau relativement faibles. Toutefois ces avantages n'existeront qu'à la condition que les mortiers soient parfaitement mastiqués avec le plat de la truelle comme ils l'ont été dans les expériences de laboratoire, ce qu'il n'est pas possible d'obtenir au même degré sur les chantiers. Il sera donc prudent d'y renoncer et de s'en tenir à une consistance suffisamment liée pour que le mortier soit d'un emploi commode.

Dès lors, si nous nous contentons d'étudier les consistances réellement pratiques, nous n'aurons à nous occuper que de la partie descendante des courbes. La figure montre que ces branches de courbes sont sensiblement des lignes droites; on a donc, entre les volumes élémentaires de tous les mortiers de même composition gâchés avec des proportions d'eau variables, la relation linéaire $(c + s) + \alpha e = \beta$ où α et β représentent des constantes et qui, mise sous la forme différentielle $\frac{-d(c + s)}{de} = \alpha$, exprime qu'à une augmentation quelconque du volume d'eau contenu dans l'unité de mortier frais correspond une diminution proportionnelle du volume réel des matières solides.

Si l'on veut savoir comment varient e et $c + s$ en fonction du poids d'eau n employé pour gâcher 100 grammes de mélange sec, on n'aura qu'à éliminer successivement $c + s$ et e entre l'équation ci-dessus et l'équation $n = \gamma \frac{e}{c + s}$ dans laquelle γ est un facteur constant dépendant des poids spécifiques et des proportions relatives du ciment et du sable. On obtiendra ainsi

$$e = \frac{\beta n}{\alpha n + \gamma},$$

$$c + s = \frac{\beta \gamma}{\alpha n + \gamma},$$

et par suite

$$v = 1 - (c + s) - e = \frac{(\alpha - \beta)n + (1 - \beta)\gamma}{\alpha n + \gamma}.$$

On remarque sur la *fig. 4* que les droites correspondant aux divers mortiers étudiés, ont des inclinaisons très différentes. Le rapport α du volume réel de matières solides perdu au volume d'eau qui le remplace varie donc avec la composition des mortiers. On a, d'ailleurs

$$d(c + s) + de + dv = 0, \text{ et par suite } \frac{dv}{de} = (\alpha - 1).$$

La variation du volume des vides est donc aussi proportionnelle à celle de l'eau contenue dans l'unité de volume de mortier.

De plus, on voit que, quand e augmente, v peut soit augmenter, soit diminuer, suivant que α est plus grand ou plus petit que 1.

La *fig. 37*, qui donne approximativement les valeurs de α correspondant aux différentes compositions granulométriques de mortiers, montre que, quand la proportion des grains fins (cim + F) est très faible, α est nul; autrement dit, le volume réel de matières solides contenu dans l'unité de volume de mortier frais est indépendant de la proportion d'eau employée pour le gâchage. L'eau ne fait que boucher une fraction plus ou moins considérable des vides restant entre les grains de sable.

La proportion de grains fins augmentant jusque vers 0,2, α croît jusqu'à environ 0,75.

Pour une petite région du triangle, limitée par la courbe cotée 1,00, et correspondant à peu près aux plus fortes valeurs de $c + s$, α est supérieur à l'unité, de sorte que, pour les mortiers correspondants, une augmentation d'eau de gâchage a pour effet, non seulement de diminuer le volume réel des matières solides, mais même d'augmenter la proportion des vides du mortier frais.

Enfin, quand la proportion de grains fins dépasse 0,5, α décroît lentement depuis environ 0,75 jusqu'à 0,50, valeur qu'il atteint pour le sommet F'.

Pour les mortiers de ciment pur ou de sable fin, une moitié de l'eau gagnée se substitue donc à de la matière solide, tandis que l'autre moitié de cette eau sert à combler un égal volume de vides.

Gâchage et mise en œuvre des mortiers. — On conçoit qu'un gâchage prolongé doive avoir pour effet de rendre plus intime le mélange et la pénétration des éléments des mortiers, et par suite diminuer le volume des vides qu'ils contiennent.

De même, il est évident que si, lors de l'emploi, on a soin de bien tasser le mortier soit avec la truelle, soit au moyen de cales introduites dans les joints des maçonneries, cette opération n'aura pas seulement l'avantage de le faire pénétrer dans les cavités et de mieux l'appliquer contre les parois des pierres, mais elle contribuera aussi à rendre plus compacte la masse du mortier proprement dite.

Autres influences. — Nous venons d'étudier dans ce chapitre les modifications qu'éprouve la compacité des mortiers frais quand on fait varier la composition granulométrique du sable, la proportion de ciment qu'on lui

combine, la quantité d'eau qu'on emploie pour le gâchage et enfin les conditions du gâchage et de la mise en œuvre. Bien que ces influences soient de beaucoup les plus importantes, elles ne sont pourtant pas les seules à considérer.

Si on laisse de côté le cas probablement assez rare de sables exerçant une action chimique sur le ciment, il n'en reste pas moins à tenir compte de l'état physique des grains de sable suivant leur degré de dureté, de poli et de porosité, comme aussi suivant leur forme. Quelques-unes de ces influences sont mises en évidence par l'expérience suivante faite avec des sables de natures différentes mais de compositions granulométriques rigoureusement identiques, obtenus chacun en mélangeant en même proportions 12 sables calibrés respectivement de mêmes grosseurs.

NATURE DU SABLE	FORME des grains	PORO- SITÉ (évaluée au juger)	POIDS SPÉCI- FIQUE (détermi- né avec l'aide du vide)	MORTIERS de bonne consistance plastique contenant en volumes absolus														
				1 ciment + 3 sable			1 ciment + 7 sable											
				$c+s$ ($c = \frac{c+s}{4}$)	e	v	$c+s$ ($c = \frac{c+s}{8}$)	e	v									
Sable granitique naturel (Cherbourg)	ronds	non poreux	2,61	0,710	0,235	0,055	0,731	0,214	0,055									
Quartzite	pilé. émoussés	id.	2,65	0,706	0,248	0,046	0,735	0,215	0,050									
										moulu anguleux	id.	2,65	0,698	0,250	0,052	0,727	0,219	0,054
Marbre pilé.	angles émoussés	id.	2,69	0,703	0,250	0,047	0,712	0,218	0,070									
Sable calcaire naturel (Belle-Ile)	ronds	poreux	2,69	0,639	0,275	0,086	0,660	0,243	0,097									
Calcaire oolithique pilé	irréguliers	id.	2,70	0,658	0,279	0,063	0,665	0,259	0,076									
Briques rouges pilées	id.	très poreux	2,65	0,551	0,362	0,087	0,535	0,364	0,101									
Pannes blanches pilées	id.	?	2,66	0,549	0,335	0,116	0,531	0,309	0,160									
Tuiles rouges pilées	id.	poreux	2,65	0,537	0,358	0,105	0,525	0,342	0,133									

On voit par ce tableau que, pour les sables non poreux, le volume absolu¹ de matières solides entrant dans un même volume de mortier est d'autant plus considérable que les grains sont de forme plus arrondie. Quant aux mortiers à sables poreux, ils exigent, pour être gâchés à bonne consistance, des proportions d'eau plus considérables, et par suite contiennent moins de matières solides par unité de volume. En outre, on conçoit que le sable doive retenir dans ses pores une certaine proportion de vides.

D'autre part, il est à noter que la méthode que nous avons employée pour étudier les variations de composition granulométrique du sable, et qui consiste à décomposer le sable total en trois catégories de grains, ne permet de reproduire que d'une manière approximative toutes les compositions granulométriques possibles, la composition granulométrique de chacun des sables G, M, F étant elle-même variable.

Par suite, deux sables naturels contenant les mêmes proportions de G, M, F peuvent donner, avec une même proportion d'un même ciment, des mortiers de compacités un peu différentes.

Enfin il ne faut pas oublier que la généralisation qui nous a permis d'établir la plupart des lois énoncées ci-dessus, repose sur une hypothèse incomplètement vérifiée, celle de l'équivalence du ciment et du sable F, et dont l'application peut donner lieu à des écarts assez sensibles, surtout si le ciment et le sable F considérés présentent des différences notables quant à leur composition granulométrique et à la proportion d'eau qu'ils exigent pour le gâchage.

De ces diverses considérations réunies il résulte que les diagrammes ne fournissent qu'une notion approximative des valeurs absolues des divers volumes qui caractérisent la capacité des mortiers. Par contre, ils donnent

une idée bien nette de leurs variations et permettent, comme on a pu s'en rendre compte, d'en prévoir les lois générales.

Toutefois l'étude de ces volumes ne présenterait qu'un intérêt assez restreint si l'on ne savait comment ils se modifient avec le temps selon les conditions d'exposition, ni dans quelle mesure ils influent sur les diverses qualités des mortiers.

C'est ce que nous allons chercher à déterminer dans les chapitres qui vont suivre.

VI. — VARIATION DE LA COMPACTITÉ AVEC LE TEMPS.

Variation du poids des mortiers. — Si l'on pèse de temps en temps des mortiers immergés dans l'eau ou laissés à l'air, on constate que leurs poids subissent d'assez fortes variations. Pour les premiers, le poids augmente rapidement d'abord, puis de plus en plus lentement. Pour les seconds, il commence par diminuer, passe par un minimum et subit ensuite une légère et lente augmentation. La durée et l'importance de ces variations dépend d'ailleurs de la nature des mortiers en même temps que de la dimension et de la forme des blocs étudiés.

L'augmentation de poids des mortiers immergés est due à la fois à l'absorption d'eau par leurs pores et à la formation de dépôts chimiques à la surface des blocs, surtout si l'immersion a lieu en eau de mer. Dans ce cas il se forme une croûte de chaux et de magnésie partiellement carbonatées dont l'épaisseur est d'autant plus forte que le durcissement du ciment était moins avancé au moment de l'immersion.

Pour des cubes de 7 centimètres de côté confectionnés en gâchant purs des ciments de différentes provenances,

l'augmentation de poids, après immersion de deux ans à l'eau de mer, a atteint en moyenne 6 p. 100 du poids initial des cubes. Des briquettes en forme de S, à section minimum de 5 centimètres carrés, fabriquées et immergées dans les mêmes conditions avec les mêmes ciments, ont augmenté dans le même temps d'environ 10 p. 100 de leur poids. Les courbes de la *fig. 5* représentent les moyennes des augmentations de poids constatées pour treize ciments de différentes provenances gâchés purs.

Pour les mortiers laissés à l'air, on peut décomposer en trois parties la quantité d'eau e entrant dans l'unité de volume de mortier frais.

La première partie e_1 entre en combinaison chimique avec le ciment dont elle détermine le durcissement. La progression continue des résistances permet de croire que cette proportion d'eau doit augmenter avec le temps.

Une seconde partie e_2 de l'eau de gâchage est retenue par capillarité dans les pores du mortier; enfin le reste e_3 s'évapore.

Nous avons reconnu que, pour tout mortier, il existait un état d'équilibre entre le volume d'eau e_2 retenu par capillarité et les conditions atmosphériques telles que la température, la pression et l'état hygrométrique de l'air. Au commencement du séchage et pendant une durée variable suivant la composition du mortier et la forme des éprouvettes, la proportion d'eau évaporée e_3 augmente jusqu'à ce qu'on atteigne cet état d'équilibre. Dès lors on peut constater que le poids du mortier subit de légères oscillations dues aux variations de l'état de l'air ambiant. Alternativement le bloc rejette une partie de son eau ou, au contraire, en emprunte à l'atmosphère, suivant que la tension de la vapeur d'eau dans l'air diminue ou augmente.

Quant à l'augmentation de poids continue que l'on

ne tarde pas à constater ensuite, elle est due en grande partie à l'absorption de l'acide carbonique de l'air par la chaux que l'eau a mise en liberté dans le ciment, absorption qui se produisait évidemment dès le commencement du séchage, mais se trouvait alors masquée par la perte d'eau due à l'évaporation.

Toutefois la carbonatation ne suffit pas à expliquer l'augmentation de poids constatée, ainsi que nous l'avons reconnu en dosant à de fréquents intervalles l'acide carbonique absorbé par des mortiers de ciment et de sable quartzes pur. On peut admettre qu'une autre partie de cette augmentation de poids est due à l'accroissement de l'eau de combinaison e_1 , lequel se produit aux dépens de l'eau e_2 en détruisant l'état d'équilibre dont il a été question ci-dessus et qui ne se trouve rétabli que par l'absorption d'une égale quantité d'eau prise à l'atmosphère.

La *fig. 6* représente les proportions d'eau et d'acide carbonique contenues après des durées variables dans divers mortiers pour chacun desquels des briquettes identiques (briquettes de 5 centimètres carrés) étaient conservées, les unes dans l'eau de mer, d'autres dans l'eau douce et d'autres à l'air, dans une cave dont l'atmosphère était maintenue à un degré à peu près constant d'humidité et de température. Ces proportions sont mesurées en fonction du poids de ciment entrant dans chaque mortier. On voit que dans l'eau de mer, plus carbonatée que l'eau douce, l'augmentation de poids a été plus considérable.

Variation des volumes c. s. e. v. — L'intervention de l'acide carbonique d'une part, et d'autre part l'incertitude où l'on se trouve en ce qui concerne la nature et l'importance des modifications apportées au ciment par le fait de la prise, rendent à peu près impossible une évalua-

tion précise des variations des volumes élémentaires qui définissent la compacité d'un mortier.

Si l'on néglige le léger retrait qui se produit souvent pendant les premières heures de séchage par suite du départ d'une partie de l'eau, surtout pour les mortiers dont le gâchage a exigé une proportion d'eau un peu forte (mortiers de sable fin), on peut admettre que le volume réel s du sable contenu dans l'unité de volume de mortier reste constant. Quant au volume c occupé par le ciment, il doit évidemment varier pendant le durcissement, puisqu'alors une partie du ciment subit une transformation chimique provoquée par l'action de l'eau qui le mouille. Mais il est probable que le volume réel des composés qui prennent naissance est en général peu différent de la somme $c + e$, de ceux qui entrent en jeu; de sorte que, à défaut de données plus certaines, on peut admettre que la prise et le durcissement ultérieur n'ont, au point de vue de la compacité, d'autre effet que de solidifier une partie de l'eau du mortier.

Reste donc à évaluer le volume de l'eau perdue pendant le séchage à l'air, volume dont s'est accru celui des vides.

Dans nos essais nous avons admis que ce volume était donné par la perte de poids maximum. Dès lors la méthode que nous avons adoptée pour rechercher comment il variait suivant la composition des mortiers, a consisté à exposer dans une atmosphère à température aussi constante que possible des cubes de 7 centimètres de côté faits avec les mortiers à étudier et que l'on pesait de temps en temps jusqu'à ce qu'on constatât qu'ils cessaient de diminuer de poids, résultat qui se produisait en général après une exposition de quelques mois.

Loi de M. Alexandre. — Dans son mémoire déjà cité, M. l'ingénieur en chef Alexandre relate quelques expériences qui l'ont conduit à conclure que, lorsqu'un mor-

tier durcit, il retient, à une petite constante près indépendante de la quantité d'eau employée, un poids d'eau proportionnel à celui du ciment ou de la chaux entrant dans sa composition. Pour les ciments essayés, la proportion trouvée a été de 17 ou 18 p. 100 du poids de ciment contenu, soit environ les $\frac{3}{4}$ de l'eau nécessaire pour le gâchage des ciments purs. Pour les chaux, l'eau retenue a été d'environ $\frac{1}{4}$ de l'eau de gâchage de la chaux pure.

Nos expériences nous ont montré que cette loi cesse complètement d'être applicable quand on fait varier entre des limites plus écartées que celles entre lesquelles s'est tenu M. Alexandre, la grosseur du sable employé et les proportions dans lesquelles on le mélange avec le ciment.

C'est ce qu'on peut constater par l'examen du tableau ci-dessous relatif à des mortiers faits avec un même ciment et exposés dans des conditions identiques :

DÉSIGNATION du mortier	NATURE DU SABLE	POIDS DE SABLE mêlé à 1 de ciment	EAU DE GÂCHAGE pour 100 de matière sèche	POIDS D'UN CUBE de mortier frais	DÉCOMPOSITION du poids du cube frais			POIDS DU CUBE après séchage de					PERTE DE POIDS maximum (par cube)	EAU RETENUE dans un cube	EAU RETENUE par 100 gr. de ciment	
					Ciment	Sable	Eau	4 jours	12 jours	4 semaines	10 semaines	24 semaines				
			0/0	gr.	gr.	gr.	gr.	gr.	gr.	gr.	gr.	gr.	gr.	gr.	gr.	0/0
G ₁	Quartzite de Cherbourg moulu (grains anguleux)	Grossueur G	1	13,3	810	358	357	95	788	785	786	787	791	25	70	19,6
M ₁		id. M	1	16,5	777	334	333	110	747	740	739	740	746	38	72	21,6
F ₁		id. F	1	19,3	719	302	301	116	691	679	675	677	685	44	72	23,8
G ₃		id. G	3	8,7	773	178	535	62	756	752	752	755	761	23	39	21,9
M ₃		id. M	3	12,5	728	162	485	81	707	693	691	695	703	37	44	27,2
F ₃		id. F	3	19,2	683	143	430	110	655	626	622	626	635	61	49	34,3
A ₄	{ Sable naturel calcaire à grains ronds. . . . }		4	12,9	711	126	504	81	696	672	667	670	675	44	37	29,4
B ₄	{ Sable obtenu en écri- sant une pierre cal- caire oolithique po- reuse. }		4	15,5	737	128	510	99	710	681	676	680	689	61	38	29,7

On peut d'ailleurs reconnaître que l'eau retenue par capillarité n'est pas négligeable, en maintenant dans une étuve à 100 degrés le mortier déjà séché longtemps à l'air libre; une nouvelle partie de l'eau s'échappe et on constate que la proportion d'eau retenue après ce nouveau séchage est d'autant plus considérable que le premier avait été plus prolongé (croissance de e_1 avec le temps).

Eau retenue par le ciment pur après séchage. — Les expériences suivantes montrent que, pour les pâtes de ciment pur, les quantités d'eau retenues après durcissement prolongé peuvent varier beaucoup suivant les conditions de l'expérience. Elles ont été faites avec un même ciment exigeant pour être gâché à consistance plastique 25 p. 100 de son poids d'eau. Les poids d'eau retenus ont été déterminés par calcination.

1° Des pâtes obtenues en gâchant ce ciment avec des proportions d'eau variant de 20 à 400 p. 100 de son poids ont été exposées à l'air dans des soucoupes; au bout d'environ deux mois de séchage, les proportions d'eau retenues ont varié de 19 à 35 p. 100 du poids du ciment.

2° Des pâtes identiques aux premières ont été coulées sur des plaques de plâtre. Au bout du même temps la proportion d'eau retenue était pour toutes voisine de 17 p. 100 du poids de ciment, quelle que fut celle employée pour le gâchage.

3° Dans un tube de verre d'environ 0^m,80 de longueur et 0^m,03 de diamètre, maintenu vertical et fermé à son extrémité inférieure, on a coulé une bouillie obtenue en délayant le ciment avec 400 p. 100 de son poids d'eau. Le ciment s'est vite rassemblé au fond et a fait prise. Au bout de deux mois les proportions d'eau retenues par le ciment dans les tranches successives de la colonne variaient de 42 p. 100 au fond à 400 p. 100 à la partie supérieure.

4° On a refait la même expérience dans un tube de verre de mêmes dimensions fermé à sa partie inférieure par une toile tendue et plongeant dans l'eau. L'eau en excès s'est écoulée à travers la toile et il n'est resté dans le tube qu'une colonne de ciment dans laquelle la proportion d'eau retenue variait de bas en haut de 41 p. 100 à 200 p. 100 du poids de ciment, bien que la partie inférieure subît plus directement le contact de l'eau où trempait le tube.

5° Enfin un tube pareil aux précédents et bouché à sa partie inférieure par un linge tendu a été rempli sur une hauteur d'environ 0^m,70 de ciment en poudre aussi peu tassé que possible, puis a été plongé par le bas dans un verre qu'on a eu soin de remplir d'eau à mesure qu'il se vidait. Peu à peu l'eau est montée par capillarité jusqu'au sommet de la colonne, puis l'absorption s'est arrêtée. Au bout d'un mois, le tube, bien que placé à l'abri des courants d'air dans une cave à température constante, s'est fendu suivant sa longueur sur toute la partie occupée par le ciment. Quand on l'a cassé un mois plus tard pour en tirer le bâton de ciment, on a remarqué que ce dernier était séparé des parois du tube par une mince couche d'eau au milieu de laquelle s'étaient formés dans la partie inférieure immergée un grand nombre de cristaux assez volumineux d'hydrate de chaux.

Des morceaux prélevés en différents points de la colonne contenaient à peu près la même quantité d'eau, soit environ 46,5 p. 100 du ciment, nombre correspondant bien à l'augmentation de poids constatée pour tout le tube et à la quantité d'eau versée dans le verre.

Eau retenue par les mortiers après séchage. — En déterminant par la méthode exposée plus haut la proportion d'eau retenue après séchage par des mortiers à dosages variables d'un même ciment et d'un même sable,

on s'aperçoit que cette proportion, maximum pour le mortier de ciment pur, décroît en même temps que la quantité de ciment contenue dans le mélange et tend vers 0 pour le mortier qui ne contiendrait que du sable pur.

Si l'on porte en abscisses les proportions de ciment entrant dans l'unité de poids de mélange sec et en ordonnées les poids d'eau retenus après séchage prolongé par chaque mélange, on constate (*fig. 14*) que la courbe correspondant à un sable donné passe par l'origine et est d'autant plus convexe vers la direction des ordonnées croissantes que le sable est plus fin. Pour les gros sables, on a presque une droite; autrement dit l'eau retenue est à peu près proportionnelle au ciment (loi de M. Alexandre); mais il n'en est plus de même pour les sables fins, qui exigent pour le gâchage une proportion d'eau assez considérable.

La figure montre aussi que la proportion d'eau retenue après séchage ne peut être représentée par la somme de deux termes respectivement proportionnels aux poids de ciment et de sable entrant dans le mortier, car s'il en était ainsi, les lignes obtenues seraient des droites passant toutes par un même point de l'ordonnée correspondant au ciment pur et coupant celle du sable pur en des points variables suivant les sables. Tel est le cas des proportions d'eau trouvées nécessaires pour les gâchages, qui sont représentées sur la figure par des lignes droites pointillées.

Les courbes qu'on obtiendrait en portant en ordonnées les poids d'eau retenus après séchage par un même volume de mortier seraient analogues à celles de la *fig. 14*.

Non seulement la quantité d'eau retenue après séchage varie suivant la nature et la proportion du sable incorporé au ciment, mais elle dépend aussi de la proportion d'eau employée pour le gâchage. Les deux courbes de la *fig. 15*

représentent les poids d'eau retenus par des mélanges en diverses proportions d'un même ciment et de sable de Boulogne gâchés, les uns avec les proportions d'eau correspondant à la bonne consistance plastique (courbe supérieure), les autres avec des proportions d'eau égales à 70 p. 100 des premières (courbe inférieure). On voit que les poids d'eau retenus après séchage prolongé par un même mélange de sable et de ciment croissent en même temps que ceux employés pour le gâchage.

De ces deux séries d'expériences, il ressort que le poids d'eau retenu après séchage :

1° Est d'autant plus faible que la proportion de ciment contenue dans le mortier est elle-même plus faible, et tend vers 0 en même temps que cette dernière ;

2° Décroit en même temps qu'on diminue la proportion d'eau mise lors du gâchage au contact d'un même poids de ciment, soit qu'on considère des mortiers de plus en plus secs, soit qu'on emploie des sables de plus en plus gros.

Dès lors, on se trouve amené à rapporter au ciment seul l'eau de gâchage et l'eau retenue après séchage et à rechercher s'il n'existe pas une relation simple entre les deux proportions ainsi définies.

En portant en abscisses les proportions d'eau de gâchage correspondant à un poids 1 de ciment et en ordonnées les proportions d'eau retenues après séchage par ce même poids de ciment supposé seul, nous avons constaté par un grand nombre d'exemples que les points obtenus pour toute série de mortiers dans laquelle un même ciment était combiné à des proportions variables de divers sables et gâché à différentes consistances, se trouvaient sensiblement sur une même ligne droite, d'où l'on peut conclure que l'eau retenue croît proportionnellement à l'eau de gâchage.

S'il en est ainsi l'eau perdue doit nécessairement subir

aussi des variations proportionnelles à celles de l'eau de gâchage, et on obtiendra encore des droites en portant en ordonnées, avec les mêmes abscisses que précédemment, les poids d'eau perdus pendant le séchage par la quantité de mortier contenant l'unité de poids de ciment. Cette construction fait même apparaître la loi d'une manière plus nette en même temps qu'elle permet de l'interpréter aisément.

Revenons par exemple, aux huit mortiers cités plus haut (p. 80). Pour ces mortiers on a :

DÉSIGNATION DES MORTIERS	G ₁	M ₁	F ₁	G ₃	M ₃	F ₃	A ₄	B ₄
Eau employée pour le gâchage de 100 gr. de ciment	26,6	33,0	38,5	34,9	50,0	77,0	64,3	77,5
Eau perdue après séchage par 100 gr. de ciment.	7,0	11,4	14,7	13,0	22,8	42,7	34,9	47,8

et on reconnaît (*fig. 7*) que les points sont tous répartis dans le voisinage d'une ligne droite coupant l'axe des abscisses un peu au delà de l'origine.

En répétant l'expérience avec d'autres séries de mortiers, on s'aperçoit qu'il en est toujours de même. Si donc, pour une série donnée, on désigne par λ le coefficient angulaire de la droite et par α l'abscisse de son point de rencontre avec l'axe des abscisses, on aura :

$$\text{Eau perdue} = \lambda (\text{eau de gâchage} - \alpha).$$

Par suite, il sera naturel de considérer α comme représentant la proportion d'eau absorbée *chimiquement* par 100 grammes de ciment et de dire que l'eau évaporée constitue une fraction constante du reste de l'eau employée pour le gâchage, tandis que la fraction constante complémentaire est retenue par capillarité dans les pores du mortier.

Pour revenir aux notations adoptées dans les chapitres

précédents, appelons c et e les volumes réels de ciment et d'eau contenus dans l'unité de volume de mortier frais ; e pourra être décomposé en trois parties e_1, e_2, e_3 constituant respectivement l'eau de combinaison, l'eau retenue par capillarité et l'eau perdue après séchage, et données par les formules suivantes dans lesquelles α' représente une nouvelle constante, quotient de α par le volume réel de 100 grammes de ciment :

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= \alpha'c, \\ e_2 &= (1 - \lambda)(e - \alpha'c), \\ e_3 &= \lambda(e - \alpha'c), \end{aligned} \right\} \begin{aligned} e &= e_1 + e_2 + e_3, \\ \frac{e_2}{e_3} &= \frac{1 - \lambda}{\lambda} = \lambda'. \end{aligned}$$

Pour la série de huit mortiers dont il vient d'être question, la proportion d'eau de combinaison atteint 17,5 p. 100 du poids du ciment et λ est égal environ à 0,72. En adoptant 3,10 comme poids spécifique du ciment, on a donc :

$$e_1 = 0,54c, \quad e_2 = 0,28(e - 0,54c), \quad e_3 = 0,72(e - 0,54c).$$

L'examen d'un grand nombre de cas particuliers nous a montré que la loi qui vient d'être énoncée n'était pas absolument rigoureuse, mais devait être considérée seulement comme une approximation. Nous avons constaté en particulier que le coefficient λ tendait à augmenter en même temps que la grosseur du sable.

Le tableau ci-contre résume quelques-uns de nos essais :

NATURE DES MORTIERS	NOMBRE de mortiers différents étudiés	VALEURS trouvées pour		OBSERVATIONS	
		α	λ		
Mortiers à divers dosages faits avec divers sables (fig. 7)	8	17,5	0,72	Droites très voisines.	
Mortiers à divers dosages d'un même ciment et de sable de Boulogne. Deux consistances différentes (ayant servi pour la fig. 15)	Consistance plastique Eau de gâchage = 70 p. 100 des précédents	25,0	0,70		
		20,0	0,67		
Mortiers à divers dosages et à diverses consistances	d'un même ciment et de sable de Boulogne	38	27,0		0,79
	d'un autre ciment et de sable de Boulogne	48	21,0		0,81
	d'un même ciment et d'un mélange sableux bien défini	25	22,0		0,65
Mortiers à divers dosages et à diverses consistances d'un même ciment et de sables quartzeux G, M, F (ayant servi pour la fig. 14)	Mortiers au sable G	20	20,5		0,96
	id. M	20	20,0		0,67
	id. F	20	25,0		0,55
	Mortiers au mélange sableux 0,5 G + 0,2 M + 0,3 F	20	27,0		0,68
Mortiers à 250 et à 500 kilogr. d'un même ciment par mètre cube de mélanges variés des trois sables quartzeux G, M, F	120	30,0	0,65	Concordance médiocre.	
Mortiers à divers dosages d'un même ciment et de mélanges variés des trois sables quartzeux G, M, F	58	18,0	0,51	Très bonne concordance.	
Mortiers à divers dosages d'un même ciment et de mélanges variés de coquilles écrasées séparées en grains correspondant aux grosseurs G, M, F	58	22,0	0,59		
Mortiers à divers dosages d'un même ciment et de mélanges variés de sables calibrés de différentes grosseurs	Sables à grains anguleux provenant de quartzite de Cherbourg moulu	69	22,0		0,70
	Sables à grains arrondis provenant d'un sable naturel quartzeux	43			

On conçoit que la proportion d'eau de combinaison trouvée doive varier suivant la nature du ciment considéré et aussi suivant le temps écoulé au moment où le cube passe par son minimum de poids (supérieur par conséquent pour les fortes valeurs de $\frac{e}{c}$). Quant au coefficient λ , qui devrait être constant si notre loi était rigoureuse, on voit par ce tableau que, si pour certains sables spéciaux il acquiert des valeurs s'écartant plus ou moins de la moyenne, néanmoins dans la plupart des cas, il reste compris entre des limites assez rapprochées.

Si donc nous continuons à considérer la loi formulée

plus haut comme une simple approximation permettant seulement de prévoir d'une manière assez grossière le sort de l'eau introduite dans les mortiers lors du gâchage, nous pourrions admettre pour λ la valeur constante $0,67 = \frac{2}{3}$ et formuler comme il suit la loi en question.

Quand un mortier de ciment Portland sèche à l'air :

1° Une partie de son eau, proportionnelle au ciment contenu et croissante avec le temps, entre en combinaison chimique avec le ciment;

2° Un tiers de l'eau en excès reste retenu par capillarité;

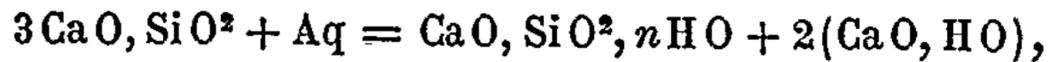
3° Les deux autres tiers de cette eau s'évaporent.

Porosité des mortiers secs. — Si l'on immerge dans l'eau un mortier ayant séché à l'air pendant un temps quelconque, on constate que son poids augmente d'une manière continue jusqu'à ce qu'il ait atteint une certaine limite. Il est alors facile de vérifier que l'eau absorbée correspond très sensiblement au volume total des vides calculés comme nous l'avons fait plus haut pour déterminer la compacité des mortiers frais, augmenté de celui des vides produits par l'eau évaporée pendant le séchage. Cette expérience confirme donc dans une certaine mesure les diverses théories qui viennent d'être exposées.

Il est pourtant un cas où il semble en être autrement : c'est celui des mortiers maigres fabriqués avec des sables contenant très peu de grains F. Les vides atteignent alors des dimensions assez considérables et laissent échapper avant la pesée, dès qu'on sort les éprouvettes de leur bain, une partie de l'eau qu'ils contiennent.

Mortiers immergés. — Si les mortiers, au lieu de durcir à l'air, sont immergés peu de temps après leur prise, l'eau commence à pénétrer par capillarité dans leurs pores et ne tarde pas à les remplir presque complètement. En même temps, une partie de ciment croissante

avec le temps s'assimile la proportion d'eau nécessaire à son hydratation, comme cela a lieu pour les mortiers à l'air. Quant à la chaux mise en liberté, ainsi qu'il résulte de la formule



elle se dissout dans l'eau de porosité; une partie cristallise à l'état d'hydrate et le reste s'échappe par exosmose. Si l'eau où baignent les mortiers est suffisamment chargée d'acide carbonique, la combinaison se produit et il se forme des dépôts, mélanges en proportions variables d'hydrate et de carbonate.

Tel est en particulier le cas des mortiers immergés dans l'eau de mer; mais là, le phénomène se complique par la substitution de la magnésie que cette eau contient à une partie de la chaux enlevée au ciment. Il peut même se faire, si l'eau est tranquille, que l'on constate la production de véritables stalagmites tubulaires résultant de l'action de l'eau de mer sur la surface extérieure des filets ascendants d'eau chargée de chaux.

Le tableau ci-dessous donne les analyses de deux échantillons différents de pareilles stalagmites; la première a été faite, il y a quelques années, au laboratoire de l'École des Ponts et Chaussées; la seconde, tout récemment, à celui de Boulogne.

	1 ^{er} échantillon.	2 ^e échantillon.
Sable	2,50	} 1,95
Silice	0,15	
Alumine.	0,05	1,50
Peroxyde de fer.	0,10	0,35
Chaux.	4,95	26,20
Magnésie	34,55	30,10
Acide sulfurique	0,45	0,35
Perte au feu	57,25	39,25
	<hr style="width: 50%; margin: 0 auto;"/> 100,00	<hr style="width: 50%; margin: 0 auto;"/> 99,70
$\frac{\text{MgO}}{\text{CaO} + \text{MgO}}$ (en équivalents) =	0,91	0,62

Il arrive même souvent, pour les mortiers immergés dans l'eau de mer, que celle-ci exerce son action à l'intérieur même de leurs pores en donnant naissance à des composés susceptibles de provoquer des désagréments redoutables.

Nous rechercherons dans le chapitre qui va suivre suivant quelles lois la production de ces phénomènes dépend de la compacité des mortiers.

VII. — FILTRATION DE L'EAU A TRAVERS LES MORTIERS.

Perméabilité des mortiers. — Tous les mortiers possèdent la propriété de se laisser traverser par l'eau. Mais, tandis que pour certains la filtration se produit presque instantanément, pour d'autres elle est beaucoup plus lente ou même ne peut avoir lieu que si l'eau agit sous une certaine pression. C'est ainsi qu'on arrive à faire traverser même des rondelles de ciment pur, en faisant le vide au-dessous d'elles. On conçoit donc que le degré d'imperméabilité à exiger des maçonneries doive varier suivant les pressions qu'elles sont appelées à supporter et leur position dans les ouvrages.

En premier lieu il est évident que, toutes choses égales d'ailleurs, la perméabilité doit être d'autant plus faible que le mortier est mieux tassé ; aussi est-il nécessaire de serrer les joints autant qu'on le peut au moyen de cales.

De même, il est clair que si le mortier, quelle qu'en soit la composition, n'est pas parfaitement homogène, certaines de ses parties seront nécessairement plus perméables que la moyenne à obtenir et pourront donner lieu à des mécomptes.

Pourtant, il ne faudrait pas croire que la quantité d'eau qui, sous une pression déterminée, traverse un mortier pendant un temps donné soit nécessairement

proportionnelle au volume total des vides de ce mortier. Elle dépend surtout des dimensions des vides considérés isolément. C'est ainsi que, si l'on compare entre eux une série de mortiers obtenus en combinant des poids égaux d'un même ciment à des sables calibrés de plus en plus gros, on constate que la perméabilité peut être très faible pour les premiers et considérable pour les suivants, bien que le volume réel de matière solide entrant dans l'unité de volume des mortiers aille en croissant en même temps que la grosseur du sable.

Il y a donc lieu d'établir une distinction bien nette entre la perméabilité des mortiers, c'est-à-dire la propriété qu'ils ont de se laisser traverser plus ou moins par l'eau, et leur porosité, c'est-à-dire la quantité d'eau qu'ils sont susceptibles d'absorber quand on les immerge, laquelle, ainsi que nous l'avons reconnu plus haut, est sensiblement égale au volume total des vides.

M. l'ingénieur en chef Alexandre, qui a tout particulièrement signalé cette différence, a montré en même temps que ces deux qualités variaient en sens inverse, de sorte qu'en général les mortiers les plus poreux sont les moins perméables et inversement.

Effets produits par le passage de l'eau. — Les effets produits par le passage de l'eau sont généralement de même nature que ceux que l'on constate le plus couramment pour les mortiers simplement immergés; une partie de la chaux mise en liberté se trouve entraînée et vient se carbonater à la surface en produisant des efflorescences ou même des stalactites d'autant plus abondantes que l'écoulement est plus intense et le mortier de fabrication plus récente.

Avec le temps, la proportion de ciment attaqué, et par suite celle des hydrates qui prennent naissance dans les pores du mortier, augmente, ce qui, joint aux impuretés

qui peuvent être apportées par l'eau, a pour effet de réduire considérablement la filtration.

Enfin, dans divers cas particuliers, et principalement quand c'est de l'eau de mer qui traverse la maçonnerie, on peut constater, après des périodes variables suivant les circonstances, des désagréations plus ou moins profondes, depuis de simples veines blanches serpentant à la surface des joints jusqu'à des crevasses béantes avec ramollissement de la masse intérieure du mortier.

En général, il n'y a pas lieu de s'effrayer de l'apparition des efflorescences et des stalactites dont il vient d'être question, car leur production plus ou moins abondante n'implique aucunement une tendance quelconque à la désagréation. De pareilles efflorescences peuvent même se former sur des mortiers à peu près imperméables, par suite du rejet progressif d'une partie de leur eau de gâchage.

Au contraire, l'apparition des veines blanches indique toujours le commencement d'une désagréation, qui peut d'ailleurs en rester là, comme elle peut aussi ne s'arrêter qu'à un degré plus avancé ou même se continuer indéfiniment jusqu'à la destruction complète de l'ouvrage.

Dans ce cas les veines, d'abord fines et déliées, deviennent de plus en plus marquées et ne tardent pas à s'ouvrir, légèrement d'abord, puis en s'écartant de plus en plus et laissant souvent passer à travers leurs fissures de nouvelles efflorescences. La paroi libre se boursoufle et se tord; des morceaux se détachent d'eux-mêmes et mettent à nu une masse de mortier qui, si elle présente encore à la surface une certaine dureté, n'offre plus à l'intérieur que la consistance d'une bouillie épaisse au milieu de laquelle on aperçoit une multitude de points blancs, produits de la décomposition du ciment par l'eau de mer.

En émiettant à la main le mortier dans de l'eau et agitant ensuite le tout, puis laissant reposer quelques instants, on arrive à séparer par lévigation une matière blanche bien homogène que l'on peut recueillir et analyser (*).

Mais la décomposition n'arrive pas toujours à ce point; souvent elle s'arrête avant d'y atteindre; les fissures, si elles se sont déjà ouvertes, se colmatent et l'on ne voit plus apparaître de nouveaux symptômes de désagrégation. On peut même constater, si les mortiers ont été

(*) Le tableau ci-dessous donne les résultats des analyses des matières extraites ainsi de divers mortiers plus ou moins décomposés. Les mortiers encore durs ont été écrasés grossièrement au pilon avant d'être soumis à la lévigation.

Les analyses ont été exécutées après séchage prolongé des matières à 110°. La plupart des matières avaient été préalablement conservées à l'état pulvérulent pendant des durées variables dans des flacons bouchés au liège où leur teneur en acide carbonique et en humidité avait pu se trouver modifiée. Au-dessous des proportions pondérales des divers éléments on a indiqué leurs proportions en équivalents rapportées à 100 équivalents de chaux et de magnésie réunies.

Désignation des matières.

Poudres blanches extraites par lévigation de :

- A Mortier de chaux pris au centre d'une maçonnerie construite en mer depuis environ quatre-vingts ans et découvrant à marée basse. Mortier bien conservé où l'on trouve encore de gros grains de chaux.
- B, C Mortiers de ciment portland et de petit gravier fabriqués depuis trente-trois ans et baignés par l'eau de mer seulement aux fortes marées. Commencement de décomposition et points blancs à l'intérieur.
- D, E, F Mortiers de ciment portland et de sable de dunes pris dans des maçonneries immergées en eau de mer depuis des durées variables (en moyenne une dizaine d'années) et complètement décomposés.
- G Réunion de plusieurs mortiers d'essai au ciment portland et au sable de dunes soumis au laboratoire depuis un à deux ans à une filtration continue d'eau de mer. Mortiers décomposés.
- H, I Briquettes de mortier sableux normal (1 ciment + 3 sable normal) confectionnées ensemble avec le même ciment et immergées depuis deux ans dans l'eau de mer, les unes (H) au laboratoire, les autres (I) dans le port de Roulogne. Aucune de ces briquettes ne présente les moindres traces de désagrégation, mais, tandis que les résistances des premières continuent à croître (25 kilogr. par centimètre carré après deux ans), celles des secondes, encore pareilles aux autres après un an, sont tombées à 7 kilogr. après deux ans d'immersion.
- J Briquettes de mortier (1 ciment + 6 sable normal) immergées dans l'eau de mer au laboratoire depuis deux ans et légèrement fissurées le long des arêtes
- K Cubes de mortier sableux (1 ciment + 3 sable normal) confectionnés avec un ci-

moulés sous forme d'éprouvettes susceptibles d'être essayées à la traction ou à la compression, que leurs résistances, qui avaient subi un temps d'arrêt ou même de recul au moment de l'apparition des fissures, reprennent une allure nettement ascendante.

Il est clair que la production de ces divers phénomènes doit dépendre en grande partie de la nature et de la qualité de l'agglomérant employé pour la fabrication des mortiers. Pourtant on constate que les différents

ment additionné de 10 p. 100 de son poids de plâtre, et immergés dans l'eau de mer au laboratoire depuis trois ans et demi. Profondément crevassés.

Croûte épaisse (0^m,09) de laitance formée à la surface de béton coulé frais dans l'eau de mer :

- L Partie inférieure (près du béton) : grise et assez compacte.
M Partie moyenne : plus claire et moins compacte.
N Partie supérieure (voisine de la surface baignée par l'eau) : blanche et friable.

Analyses chimiques.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	
Proportions en poids.	Silice.	21,0	24,6	22,0	18,1	22,2	39,6	36,7	30,9	24,7	26,4	20,7	29,6	21,6	19,0
	Alumine.	5,1	4,2	5,0	7,5	8,1	5,0	4,2	4,9	5,0	5,6	6,4	4,9	5,1	5,0
	Sesquioxyde de fer	1,9	1,6	1,6	1,2	1,4	2,0	1,1	1,5	1,3	1,4	1,5	1,9	1,9	1,9
	Chaux.	40,4	26,6	28,2	23,4	27,0	14,9	25,2	37,3	35,4	25,6	28,1	47,7	50,2	49,7
	Magnésie.	2,5	11,9	10,7	15,2	10,1	12,3	5,3	2,0	5,3	10,6	11,2	1,5	2,3	3,0
	Acide sulfurique. .	5,1	2,6	5,2	7,1	3,5	1,1	4,4	1,7	3,2	2,0	8,2	0,7	1,1	1,6
	Acide carbonique. .	11,0	15,4	14,4	13,1	14,8	12,3	12,6	11,4	12,2	17,0	10,5	5,0	6,2	7,2
	Eau.	13,0	13,1	12,9	14,4	12,9	12,8	10,5	10,3	12,9	11,4	13,4	8,7	11,6	11,7
	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
Proportions en équivalents.	Magnésie. . . } 100	8	38	35	48	34	54	23	7	17	37	36	4	6	8
	Chaux. }	92	62	65	52	66	46	77	93	83	63	64	96	94	92
	Alumine. }	6	5	6	9	11	8	7	7	6	7	8	5	5	5
	Sesquioxyde de fer.	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1
	Eau.	92	94	93	101	98	124	100	80	94	87	95	54	68	68
	Acide carbonique. .	32	45	43	38	46	49	49	36	37	53	31	13	15	17
	Acide silicique. . .	45	53	48	38	51	115	105	72	54	61	44	35	38	34
Acide sulfurique. .	8	4	8	11	6	2	10	3	5	3	13	1	1	2	

On voit par ces nombres que la composition des matières est variable suivant les mortiers et ne correspond à aucune formule chimique bien définie. En général, plus le mortier a atteint un degré avancé de décomposition, plus la matière blanche qu'on peut en extraire est abondante, et plus est considérable la teneur de cette matière en magnésie.

mortiers qu'on peut faire avec un même ciment par exemple, sont loin de se comporter de la même manière quand on les expose dans des conditions identiques. Tandis que tels d'entre eux resteront intacts pendant une durée à peu près illimitée, d'autres pourront subir une décomposition plus ou moins rapide et plus ou moins profonde. Il importe donc de rechercher dans quelle mesure la perméabilité et la désagrégation des mortiers dépendent de leur composition.

Procédés d'expérience. — Les premières expériences de perméabilité que nous avons exécutées au laboratoire de Boulogne ont consisté à confectionner avec les divers mortiers à étudier des cuvettes hémisphériques identiques qu'on emplissait d'eau maintenue à niveau constant par un dispositif spécial. L'appareil n'était autre qu'un flacon de Mariotte installé au-dessus de chaque cuvette de telle sorte que l'eau qui s'échappait par filtration à travers les parois de cette dernière fut continuellement remplacée par de nouvelle eau venant du flacon et qu'il suffisait de mesurer pour comparer la perméabilité des mortiers (*).

Ce dispositif permettait d'étudier facilement la filtration de divers liquides ; par contre, il se prêtait mal à des expériences de longue durée.

Dans la suite, nous avons donné aux mortiers d'essai la forme de cubes dont chaque face mesurait 50 centimètres carrés, et dans lesquels, en les gâchant, on scellait un tube de verre d'environ 1 centimètre de diamètre pénétrant jusqu'en leur centre. Après séchage convenable à l'air (une à deux semaines suivant les expériences), les cubes étaient suspendus par leur tube de verre à des

(*) On trouvera le dessin de cet appareil dans une note antérieure où il en a été déjà question (*Annales des Ponts et Chaussées*, 1890, I, Pl. 19, fig. 3).

tubes de caoutchouc mis en communication avec un réservoir où de l'eau de mer était maintenue automatiquement à un niveau constant supérieur de 2 mètres à celui des cubes. En recueillant dans un verre placé sous chaque bloc de mortier l'eau écoulée à travers ses parois pendant une durée déterminée, on avait une mesure de sa perméabilité.

Grâce à ce dispositif, qui nous a permis d'opérer simultanément sur un grand nombre de cubes, nous avons pu laisser chacun soumis à une filtration continue d'eau de mer et observer les altérations qu'il éprouvait avec le temps (*).

A la suite d'essais comparatifs exécutés en opérant sur des cubes laissés à l'air ou trempant dans l'eau de mer, nous avons adopté la seconde disposition comme se prêtant le mieux aux expériences.

De temps en temps on examinait les mortiers, on mesurait leur perméabilité et on notait toutes les particularités qu'ils présentaient.

Nous n'avons pas tardé à nous apercevoir que la production des efflorescences ne présentait aucune importance et dépendait simplement de la quantité d'eau qui traversait le cube dans un temps déterminé. Aussi ne mentionnerons-nous pas les observations s'y rattachant. Au contraire, ayant été amené à reconnaître que l'apparition des premières veines pouvait être considérée comme le criterium de la désagrégation du mortier, c'est cette époque, comptée à partir de la mise en expérience, que nous nous sommes toujours efforcé de déterminer avec le plus de soin, et que nous spécifierons avant tout dans la relation des essais. Enfin nous indiquerons l'état final des mortiers, afin qu'on puisse juger de la rapidité de la

(*) Pour quelques mortiers très perméables, on a dû réduire l'écoulement au moyen d'un dispositif spécial.

Il y a lieu aussi de tenir compte dans une certaine mesure de ce que l'hydratation du ciment contenu dans les mortiers est progressive, de sorte que avec le temps une fraction croissante de l'eau de gâchage se trouve solidifiée en bouchant une partie des pores qui la contenaient.

C'est ainsi que, si l'on soumet à la filtration après des durées de séchage variables des mortiers identiques confectionnés en même temps, on constate que l'écoulement initial de l'eau est d'autant plus faible que le durcissement à l'air a été plus prolongé.

Influence de la nature du liquide filtrant. — La quantité de liquide qui, à une même époque, traverse un même mortier dans un temps donné, est à peu près indépendante de la nature de ce liquide.

En ce qui concerne la désagrégation, il semble, ainsi que cela est d'ailleurs à peu près établi depuis longtemps, qu'elle soit due exclusivement à la présence du sulfate de magnésie. C'est ainsi que divers mortiers ont pu être traversés impunément pendant plusieurs mois par de l'eau douce ou des solutions de chlorure de sodium, de chlorure de magnésium et même de sulfate de chaux, tandis qu'ils se sont fissurés en moins d'un mois sous l'action de l'eau de mer ou de solutions de sulfate de magnésie.

Nous avons déjà adressé à la Commission des ciments deux notes relatives à des expériences de cette nature, notes qui ont été reproduites dans les comptes rendus lithographiés des séances de cette Commission.

Influence de l'eau de gâchage. — La nature de l'eau employée pour le gâchage (eau douce ou eau de mer) semble exercer peu d'influence sur la perméabilité ou la décomposition des mortiers par l'eau de mer. Par

contre, la proportion de cette eau, dont dépend la consistance du mortier, joue un rôle important.

Ainsi que l'ont déjà constaté MM. Durand - Claye et Debray (*), « pour chaque nature de mortier et de sable, il y a une dose déterminée d'eau qui correspond au maximum de compacité et au minimum de perméabilité des mortiers. »

En ce qui concerne la compacité, cette loi ressort d'une manière bien nette des diagrammes de la *fig. 4*.

Nos expériences de perméabilité l'ont également confirmée en montrant que, surtout quand la proportion d'eau de gâchage est inférieure à celle qui correspond à la perméabilité minimum, la filtration augmente dans des proportions considérables.

Une première série d'expériences a été faite avec des mortiers obtenus en mélangeant en diverses proportions un même ciment et du sable de dunes fin passant au tamis de 324 mailles par centimètre carré et retenu par celui de 900 mailles, et gâchant chaque mélange avec trois proportions d'eau différentes. Le tableau ci-dessous indique approximativement les quantités d'eau moyennes ayant traversé par heure chaque cuvette au début de l'expérience.

POIDS DE SABLE ADDITIONNÉ A 1 DE CIMENT	3	4	5	6	7	8
	cm ³	cm ³	cm ³	cm ³	cm ³	cm ³
Proportion d'eau employée pour le gâchage. . .	8 p. 100	15 p. 100	22 p. 100	du poids total de matière sèche.		
	3.500	1.500	1.600	4.000	8.000	9.000
	3	7	13	20	99	230
	6	31	49	81	250	?

Pour les mortiers gâchés avec 8 p. 100 d'eau, dont la perméabilité a été considérable et a diminué très rapidement (non sans avoir parfois commencé par croître pen-

(*) *Annales des Ponts et Chaussées*, 6^e série, XV, p. 816 (mai 1888).

dant la première heure), on a pris la moyenne des écoulements pendant les deux premières heures. Pour les autres, dont le débit était bien moindre, on s'est contenté de diviser par 24 la quantité d'eau totale écoulée pendant le premier jour de filtration.

Le tableau ci-dessous donne les augmentations de poids par kilogramme de mortier, constatées pour les différentes cuvettes à la suite de l'expérience :

POIDS DE SABLE ADDITIONNÉ A 1 DE CIMENT	3	4	5	6	7	8
Proportion d'eau employée pour le gâchage. . .	8 p. 100	15 p. 100	22 p. 100			
	gr. 106	gr. 98	gr. 98	gr. 112	gr. 140	gr. 149
du poids total de matière sèche. . .	24	33	35	42	44	52
	36	40	48	43	83	?

En le comparant au premier, on remarque que l'eau retenue est d'autant plus abondante que l'écoulement était plus considérable.

Le tableau suivant correspond à une autre série d'expériences :

	PROPORTION D'EAU employée pour le gâchage	ÉCOULEMENT moyen par heure pendant les 2 premières heures	EAU RETENUE après l'expérience par 1 kilog. de mortier.	EAU PERDUE par 1 kilog. de mortier après séchage de 15 jours à la suite de l'expérience
	p. 100	cm ³	gr.	gr.
Mortiers dosés à raison de 1 partie en poids d'un même ciment pour 5 parties de sable de dunes. 324-900.	7	?	161	61
	9	2.500	103	50
	11	1.250	76	58
	13	200	32	47
	15	45	20	50
	17	48	25	46

La faiblesse des écarts entre les nombres de la dernière colonne montre que le passage de l'eau a eu pour effet d'effacer en partie les différences résultant pour les divers mortiers des quantités d'eau employées à les gâ-

cher. C'est ce qui ressort encore plus clairement de l'expérience suivante qui montre que, à la longue, les perméabilités, tout d'abord très différentes, se rapprochent de plus en plus.

	PROPORTION D'EAU employée pour le gâchage	ÉCOULEMENT MOYEN PAR HEURE		
		pendant les 2 premières heures	après 1 jour de filtration continue	après 4 jours de filtration continue
	p. 100	cm ³	cm ³	cm ³
Mortiers dosés à raison de 1 partie en poids d'un même ciment pour 5 parties de sable de dunes. 321-900.	9	5.655	197	68
	12	405	124	70
	15	53	64	45
	18	155	64	43
	21	173	97	49
	24	158	84	53

Bien qu'ayant fait plusieurs séries d'expériences en vue de rechercher l'influence de la proportion d'eau de gâchage sur la décomposition des mortiers traversés par l'eau de mer, nous ne pouvons actuellement formuler aucune conclusion à cet égard, les décompositions s'étant la plupart du temps produites sans aucune loi apparente. Aussi est-il probable que cette influence est peu importante, comme cela doit être si, ainsi qu'il semble résulter des expériences de perméabilité, le passage de l'eau tend à niveler les différences provenant des proportions d'eau employées pour le gâchage.

Influence de la nature de l'agglomérant. — On constate que des mortiers de même dosage faits avec un même sable et divers agglomérants ont souvent des perméabilités assez différentes. Mais, outre que l'on n'est jamais sûr de leur avoir donné même tassement, on sait que les quantités d'eau qu'il est nécessaire d'employer pour les amener à avoir même consistance varient suivant les agglomérants employés et doivent être déterminées spécia-

lement pour chaque mortier. Il est donc possible que les différences de perméabilité observées soient dues simplement à de légères différences de consistance.

En ce qui concerne la décomposition provoquée par le passage continu de l'eau de mer, on constate qu'en général elle correspond assez bien aux notions que l'on possède actuellement touchant la qualité des ciments, de sorte que les produits réputés les meilleurs semblent mieux résister que ceux de fabrication moins soignée. Toutefois cette règle est loin d'être absolue et se trouve souvent en défaut.

Mais là encore la comparaison présente bien des difficultés. Tel ciment qui, gâché frais, donne des mortiers se fissurant rapidement à l'eau de mer, peut devenir d'un emploi excellent si on le laisse vieillir un peu en magasin avant de s'en servir. Tel mortier qui, exposé à l'eau de mer après séchage d'une ou deux semaines, ne tardera pas à se décomposer, se maintiendra au contraire longtemps intact si on le laisse durcir un peu plus longtemps à l'air.

Si donc on veut comparer plusieurs ciments et qu'on mette tous les mortiers en expérience après une même durée de séchage, la manière dont ils se comporteront pourra dépendre du degré de dureté que chacun aura acquis à ce moment, et le résultat différer tout à fait de celui qu'on aurait obtenu en partant d'une autre durée. Mais alors quelle règle adopter et comment juger des conditions les plus favorables au bon développement des qualités de chaque échantillon? Le problème est donc fort complexe et la conclusion souvent douteuse.

Ces inconvénients se trouvent fort atténués dès que, cessant de s'adresser à des produits différents, on se borne à étudier les multiples modifications qu'apporte dans la composition des mortiers la variété des conditions d'emploi d'un même ciment.

Influence de la richesse des mortiers. — La perméabilité diminue rapidement à mesure qu'on augmente la proportion de ciment combinée à un même sable. On en a vu déjà un exemple dans le tableau de la page 99 relatif à l'influence de la proportion d'eau. On remarque que, dans ce tableau, les nombres de la première ligne, qui correspondent à des mortiers trop secs et par suite difficiles à tasser également, présentent entre eux des écarts variant de la façon la plus irrégulière. Même, le premier de ces nombres, beaucoup plus fort que ne ferait prévoir la loi de continuité, constitue une anomalie due sans doute à quelque erreur de gâchage.

Au contraire, les perméabilités des mortiers de la seconde et de la troisième ligne, dont la consistance bien plastique ou un peu molle rendait la manipulation plus facile et plus uniforme, suivent une progression parfaitement régulière qu'on peut rendre manifeste par la méthode graphique. La *fig. 9*, dans laquelle on a pris pour abscisses les dosages de ces mortiers exprimés en poids de ciment par mètre cube de sable (poids du mètre cube de sable = 1.445 k.), montre que, lorsqu'on augmente progressivement ces dosages, la perméabilité diminue rapidement d'abord jusqu'au dosage d'environ 250 kilogrammes de ciment par mètre cube du sable considéré, puis suivant une allure uniforme et beaucoup plus lente.

Les tableaux qui suivent relatent des expériences de même nature faites sur des cubes traversées continuellement pendant deux ans par l'eau de mer :

ÉCHANTILLON DE CIMENT NATUREL DE MAUVAISE QUALITÉ									
SABLE QUARTZEUX NORMAL. 64-144 (poids du mètre cube de sable = 1.280 kilogr.)									
Poids de ciment { pour 100 kilogr. de sable. par mètre cube de sable.	10 kg	45 kg	20 kg	25 kg	30 kg	35 kg	40 kg	45 kg	50 kg
	128 kg	192 kg	256 kg	320 kg	384 kg	448 kg	512 kg	576 kg	640 kg
Écoulement { au début de l'expérience. par après deux ans de heure filtration. Epoque de l'apparition des premières veines.	66.000 cm ³	52.200 cm ³	28.800 cm ³	2.780 cm ³	64 cm ³	7 cm ³ ,5	0	0	3 cm ³ ,5
	22.900 cm ³	14.400 cm ³	3 cm ³ ,1	0 cm ³ ,2	0	0	néant	néant	0
État du mortier après deux ans. Résistance à la compression par centimètre carré après deux ans.	intact	intact	simples veines	intact	intact	11 mois légères fissures colmatées	intact	intact	intact
	*	34 kg,5	43 kg	66 kg,5	87 kg,5	94 kg	104 kg	133 kg	170 kg
ÉCHANTILLON DE CIMENT NATUREL DE MAUVAISE QUALITÉ (le même que pour l'expérience précédente)									
SABLE DE DUNES. 324-900 (poids du mètre cube de sable = 1.445 kilogr.)									
Poids de ciment { pour 100 kilogr. de sable. par mètre cube de sable.	10 kg	45 kg	20 kg	25 kg	30 kg	35 kg	40 kg	45 kg	50 kg
	145 kg	217 kg	289 kg	361 kg	434 kg	506 kg	578 kg	650 kg	722 kg
Écoulement { au début de l'expérience. par après deux ans de heure filtration. Epoque de l'apparition des premières veines.	467 cm ³	61 cm ³	38 cm ³	6 cm ³	43 cm ³	2 cm ³	2 cm ³	1 cm ³	4 cm ³
	0 cm ³ ,1	0 cm ³ ,1	0 cm ³ ,2	0	0 cm ³ ,6	0 cm ³ ,4	0 cm ³ ,1	0	0
État du mortier après deux ans. Résistance à la compression par centimètre carré après deux ans.	intact	fissures colmatées	1 semaine des morceaux du cube se sont détachés, il ne reste qu'un noyau sphérique.	2 semaines veines fortement accentuées	1 semaine Fissures profondes	2 semaines veines fortement accentuées	1 semaine Fissures légères	4 semaines veines fortement accentuées	2 mois simples veines
	12 kg	16 kg	67 kg	67 kg	16 kg,5	79 kg,5	89 kg	140 kg	145 kg

		ÉCHANTILLON DE CIMENT DE LAITIER SABLE DE DUNES NATUREL (Poids du mètre cube = 1.460 kilogr.)				ÉCHANT. DE CHAUX HYDRAULIQUE SABLE DE DUNES NATUREL (Poids du mètre cube = 1.460 kg.)		
Poids d'agglomérant	pour 100 kilogr. de sable par mètre cube de sable	10 ^{kg} ,3	17 ^{kg} ,2	24 ^{kg} ,0	30 ^{kg} ,9	17 ^{kg} ,2	24 ^{kg} ,0	30 ^{kg} ,9
		150 ^{kg}	250 ^{kg}	350 ^{kg}	450 ^{kg}	250 ^{kg}	350 ^{kg}	450 ^{kg}
Ecoulement par heure	au commencement de l'expérience après deux ans de filtration	217 ^{cm} 3	19 ^{cm} 3	1 ^{cm} 3	1 ^{cm} 3	6 ^{cm} 3	0	0
		18,5 ^{cm} 3	0 ^{cm} 3,8	0 ^{cm} 3,7	0	0	0	0
Epoque de l'apparition des premières veines.		13 mois	2 semaines	2 mois	néant	17 mois	néant	néant
Etat du mortier après deux ans		légères fissures colmatées	très légères veines	fissures	intact	légères fissures colmatées	intact	intact
Résistance à la compression par centim. carré après deux ans		6 ^{kg} ,5	43 ^{kg} ,5	39 ^{kg} ,5	74 ^{kg} ,5	17 ^{kg}	25 ^{kg} ,5	51 ^{kg} ,5

On voit que le maximum de décomposition ne se produit pas pour les mortiers les plus maigres, comme on pourrait le supposer *a priori*, mais bien pour des dosages moyens. Le tableau de la page 97 en avait déjà donné un exemple. Cette loi, que confirment encore beaucoup d'autres essais non mentionnés dans cette note, doit être due à ce que la quantité de ciment entrant dans les mortiers très maigres ne suffit pas à produire la proportion d'expansifs nécessaire pour obstruer leurs pores et les faire éclater.

Il est évident d'ailleurs que cette explication n'implique aucunement que la décomposition doive être d'autant plus énergique que le mortier devient plus riche, car en même temps la compacité de celui-ci augmente et le ciment qu'il contient offre moins de prise à l'eau de mer. En outre, la cohésion du mortier est plus grande et exige pour être rompue un effort plus considérable.

Si telle est bien la raison du phénomène observé, le dosage correspondant à la décomposition maximum doit être d'autant moins maigre que le ciment employé con-

tient par sa nature et le soin apporté à sa fabrication moins d'éléments latents de décomposition.

Influence de la composition du sable. — Sans nous arrêter aux accidents qui peuvent être dus à la nature chimique des sables employés, comme c'est le cas quand ces sables contiennent des éléments susceptibles de se désagréger eux-mêmes avec le temps, nous aborderons immédiatement l'étude de sables supposés inertes, mais différant par leurs grosseurs.

Une première série d'essais a été faite avec des sables calibrés obtenus en passant à divers tamis un sable obtenu par la mouture de quartzites de Cherbourg. Le tableau ci-contre rend compte des résultats obtenus jusqu'à la période de trente-huit mois, les cubes étant encore en expérience.

Échantillon de ciment portland.	Tamis limitant chaque sable (nombre de mailles par centim. carré). (Grossesse du sable)	4-9 très gros	9-36 gros	36-64 moyen	64-144 moyen (sable normal)	144-324 moyen	324-900 fin	900-5.000 très fin	passe 5.000 farine
Série A. 1 partie en poids de ciment + 3 parties de sable. Consistance plastique.		0	18 900	30 600	30 780	20 100	3 300	0	0
		néant	0,1	0,3	0,7	néant	néant	0,1	0
Série B. 1 partie en poids de ciment + 6 parties de sable. Consistance plastique.		278.400	288.600	124.800	127.200	33.000	420	14,5	4,5
		néant	26 000	12,8	5,0	2,1	1,3	0,2	0,1
Série A'. 1 partie en poids de ciment + 3 parties de sable. Consistance sèche. (Eau de gâchage = 70 % de la série A.) Mortiers comprimés.		150.600	117.600	75.600	82.200	23.200	550	64,5	2
		néant	4,7	1,0	0,5	0,6	0,6	0	0
Série B'. 1 partie en poids de ciment + 6 parties de sable. Consistance sèche. (Eau de gâchage = 70 % de la série B.) Mortiers comprimés.		212 400	216.600	156.000	87.300	55.800	20.000	455	20
		néant	24.800	7.100	1,3	0,8	0,4	0,7	0,2

On voit qu'en général la perméabilité augmente rapidement avec la grosseur du sable, au moins quand il s'agit de mortiers maigres, tandis qu'au contraire la décomposition est la plus active pour les mortiers de sable fin. Les deux tableaux de la page 104 fournissent par leur comparaison une confirmation de cette loi.

Toutefois l'examen de mortiers où n'entrent que des sables calibrés de différentes grosseurs ne suffirait pas à montrer comment doivent se comporter les mortiers de chantier confectionnés avec les sables plus ou moins mélangés que l'on rencontre dans la nature. Nous avons montré au début de ce mémoire que, pour avoir des idées exactes sur les diverses propriétés des mortiers de la pratique, il était nécessaire de faire intervenir la notion de composition granulométrique. Aussi avons-nous répété l'expérience avec des mélanges en diverses proportions d'un même ciment portland et des trois sables quartzeux élémentaires G, M, F définis plus haut.

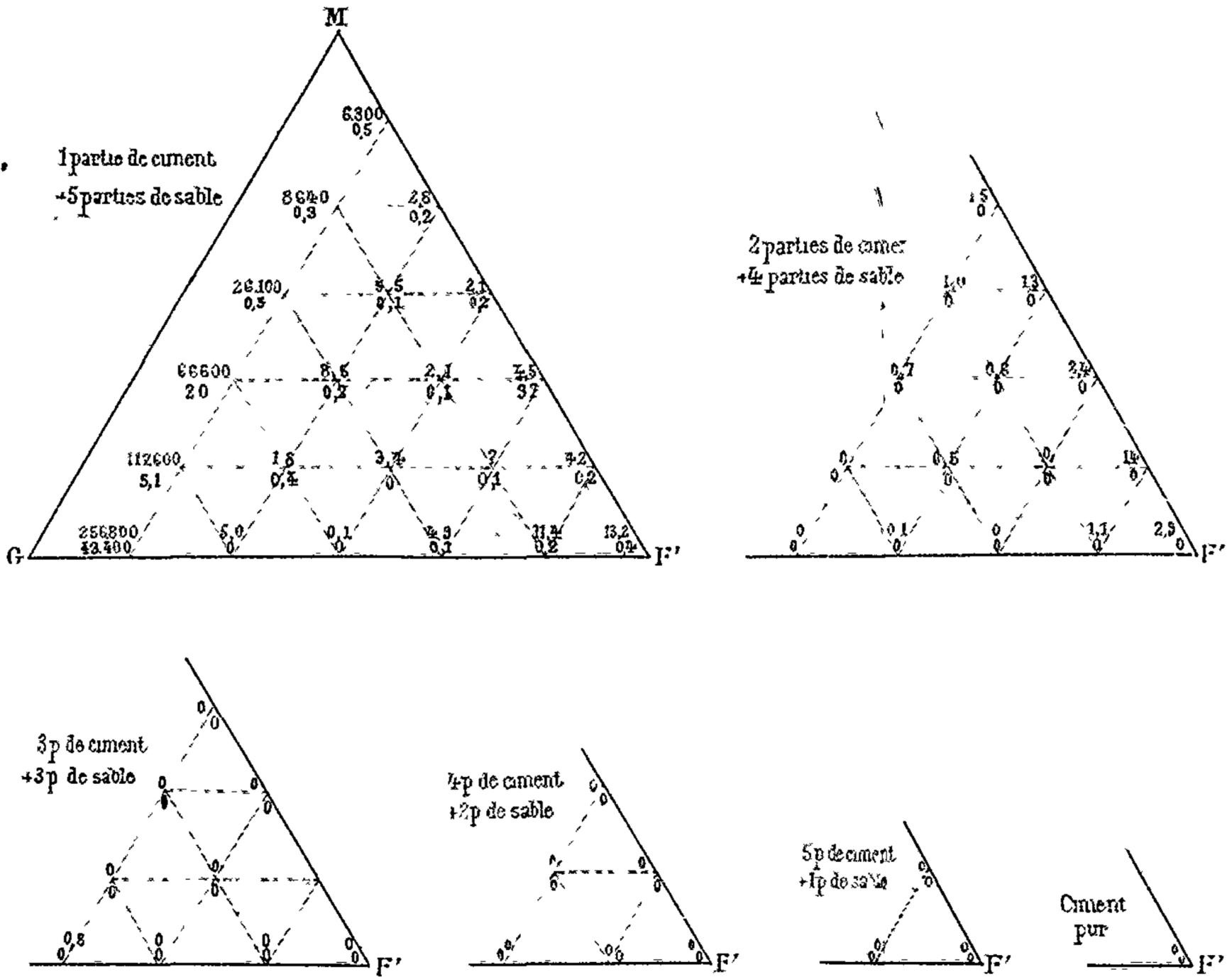
Le volume réel absolu des matières solides entrant dans chaque mortier étant supposé décomposé en six parties égales, nous avons formé toutes les combinaisons possibles des quatre éléments : ciment, sable G, sable M, sable F, telles que chacun d'eux occupât un nombre entier ou nul de ces parties, et gâché à bonne consistance plastique les 46 mortiers correspondants.

Les cubes, mis en expérience après séchage de onze jours à l'air, ont donné lieu aux observations reproduites par les diagrammes ci-contre (*fig. 42*), établis, d'après la règle précédemment exposée, en réunissant sous la dénomination de grains fins (F') l'ensemble du sable F et du ciment. On peut encore considérer les parties utiles de ces diagrammes comme les sections par une série de plans parallèles à sa base, d'un tétraèdre régulier dont les sommets de la base représenteraient les trois sables G, M, F et le quatrième sommet le ciment pur.

Fig. 42.

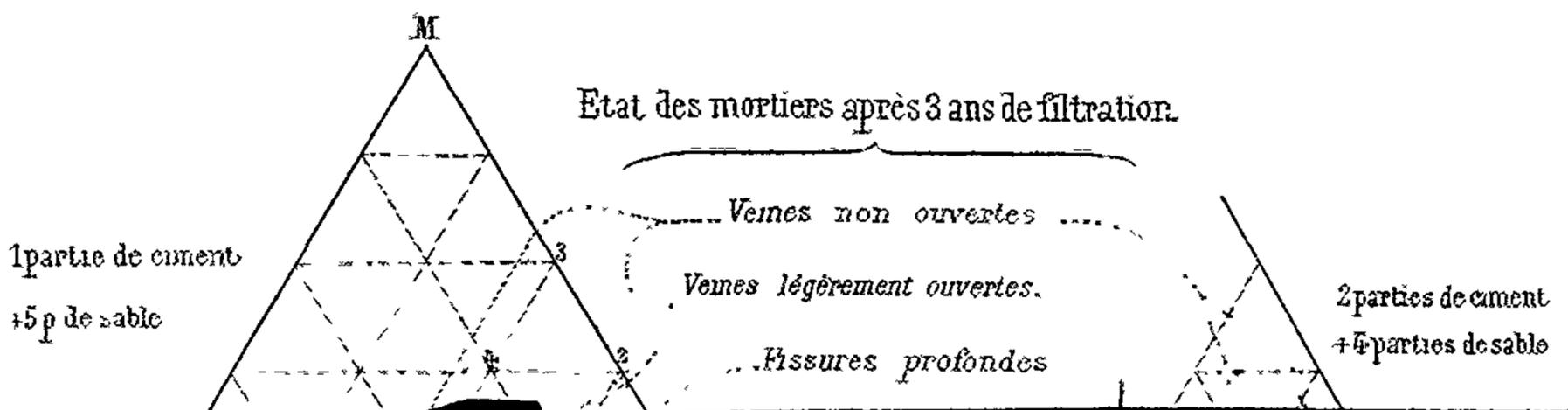
Écoulements par heure en centimètres cubes

{ Au début de l'expérience (Nombres supérieurs)
Après 3 ans de filtration. (Nombres inférieurs.)



Époque de l'apparition des premières veines

(en semaines comptées à partir de la mise en expérience.)



Bien que l'expérience continue encore, on peut en tirer dès maintenant les conclusions suivantes :

1° De tous les mortiers de même composition granulométrique, les plus perméables sont ceux qui contiennent le moins de ciment.

2° De tous les mortiers de même richesse, mais de composition granulométrique variable, ceux qui contiennent très peu de grains fins sont de beaucoup les plus perméables. Ils le sont d'ailleurs d'autant plus que, à égale proportion de grains F', les grains G prédominent plus par rapport aux grains M. Le minimum de perméabilité a lieu pour les mortiers dans lesquels, la proportion de grains M étant faible, celles des grains G et des grains F' sont à peu près égales entre elles.

3° La décomposition produite par le passage continu de l'eau de mer à travers des mortiers de même dosage (en poids), mais de compositions granulométriques variables, est d'autant plus rapide et plus énergique que le sable contient plus de grains fins.

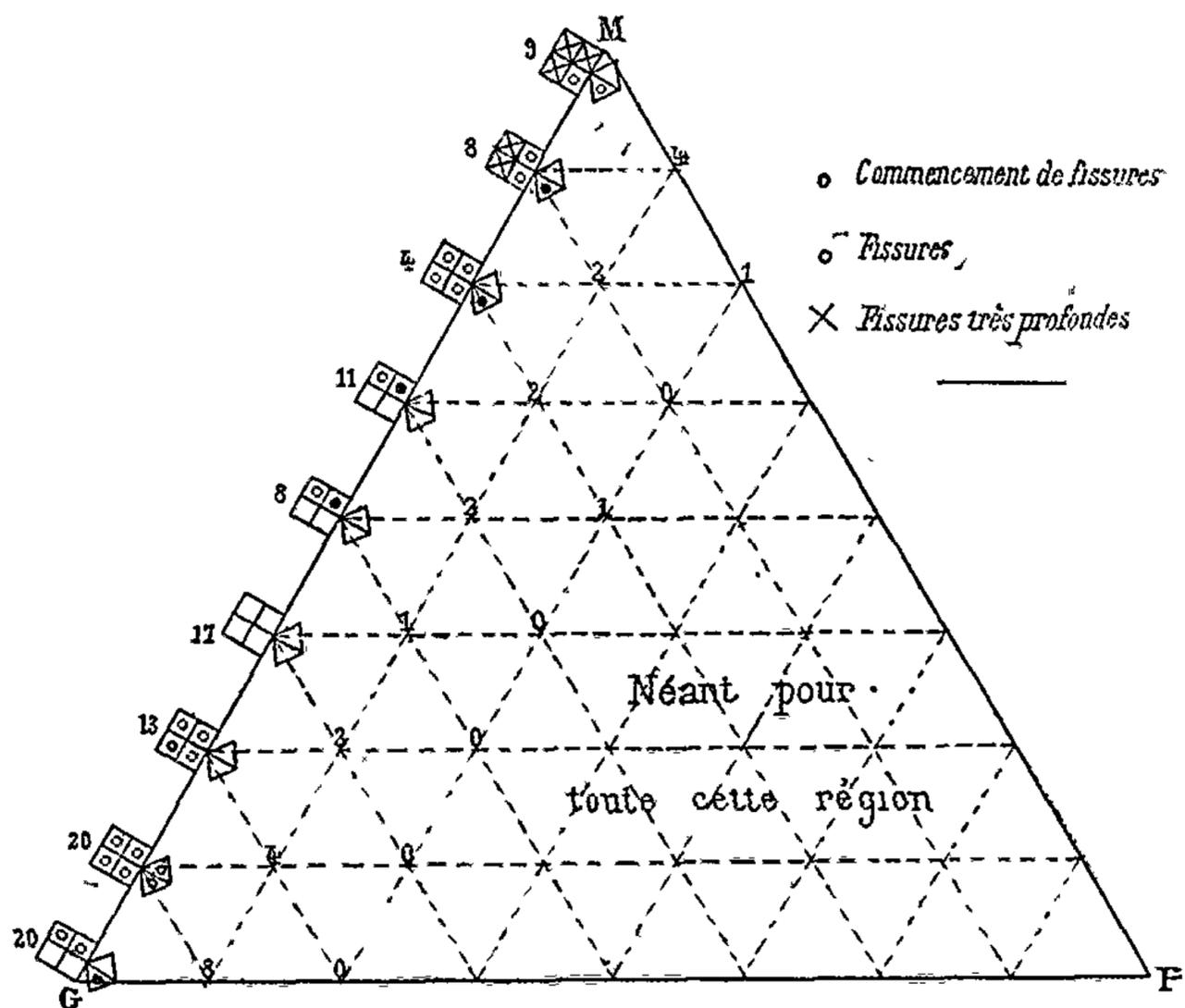
Cette dernière observation est d'une grande importance et explique en partie les graves accidents que l'on a eu à déplorer dans les ports où l'on n'avait à sa disposition pour la confection des mortiers que le sable de dunes qui, quelle qu'en soit la provenance, est toujours représenté par des points se confondant presque avec le sommet F du triangle.

Décomposition par simple immersion. — Il est utile de rapprocher de ces résultats les effets constatés sur des cubes qui, au lieu d'être traversés intérieurement par un courant continu d'eau de mer, étaient simplement immergés dans cette eau.

Ces mortiers étaient dosés à raison de 250 kilogrammes d'un même ciment portland par mètre cube de divers sables obtenus en mélangeant en proportions variées les

trois sables quartzeux G, M, F. Quatre cubes de chaque espèce étaient immergés dans de l'eau de mer renouvelée toutes les semaines et deux autres dans un bac qu'on laissait vide tous les jours pendant quelques heures et qu'on remplissait ensuite d'eau de mer.

Le diagramme ci-dessous montre quel était après six mois d'expérience l'état de décomposition des divers cubes. Pour les mortiers du côté GM, les seuls où l'on ait constaté des désagréments, on a représenté par quatre carrés les quatre cubes immergés continuellement et par deux triangles les cubes soumis à la marée. Des signes spéciaux inscrits dans ces figures représentent l'état de ces divers cubes. Les carrés ou triangles qui ne



contiennent aucun signe correspondent à des cubes non désagréés. Quant aux chiffres, leur valeur, variable de

0 à 20, représente approximativement le degré d'importance des efflorescences produites à la surface des mortiers. Chaque mortier est représenté dans le triangle par le point représentatif du sable dont il est fabriqué.

On voit qu'ici l'effet produit a été tout opposé à celui qui vient d'être signalé au sujet des expériences de perméabilité. Tandis que les mortiers de sables fins ont résisté et ne présentent encore, après trois ans d'immersion, aucune trace de décomposition, ceux où le sable fin faisait défaut se sont presque tous fissurés, et cela d'autant plus que le sable était composé de grains de grosseur plus uniforme.

On remarque en même temps que les cubes continuellement immergés étaient tous plus endommagés que ceux auxquels on faisait subir l'action de la marée.

Il semble donc qu'il y ait une flagrante contradiction entre les deux expériences. Pourtant les effets de chacune sont tellement nets, qu'il est impossible de douter de son exactitude. Il en résulte qu'on devra attribuer la divergence observée à la différence du mode d'action de l'eau de mer dans les deux cas.

C'est ce mode d'action que nous allons maintenant chercher à expliquer en nous appuyant sur les résultats de l'expérience.

Processus mécanique de la désagrégation. — Un premier point bien nettement établi par ce qui précède est qu'on doit distinguer dans les effets produits par l'eau de mer sur les mortiers deux catégories de phénomènes bien distincts, les uns d'ordre chimique, qui se manifestent par la formation de dépôts blancs, les autres d'ordre mécanique consistant en dilatations et en fissures. Si ceux-là peuvent se produire sans que ceux-ci leur succèdent nécessairement, par contre on ne peut concevoir les seconds sans les premiers comme cause déterminante, et

en fait on constate sur les mortiers désagrégés, sinon toujours des efflorescences extérieures, au moins des points blancs disséminés dans leur masse.

D'autre part, quand on passe en revue l'ensemble des diverses expériences de filtration qui viennent d'être relatées, ce qui frappe d'abord c'est que, d'une manière générale, les fissures se sont produites à peu près exclusivement dans les mortiers à travers lesquels l'eau circulait lentement, soit que cette faible filtration fut une conséquence immédiate de leur composition, ou que ces mortiers, d'abord plus perméables, se fussent peu à peu colmatés par suite du passage continu de l'eau de mer. Quant aux cubes à peu près imperméables et à ceux qu'au contraire l'eau traversait avec une grande facilité, ils ont presque toujours résisté à la désagrégation alors même que leur composition aurait pu faire craindre *a priori* une démolition assez rapide, avec cette différence toutefois que les premiers sont la plupart du temps restés sensiblement dans l'état où ils se trouvaient lors de leur mise en expérience, tandis que les seconds se sont tapissés d'efflorescences plus ou moins abondantes s'étalant à leur surface ou même suspendues à leurs parois sous forme de stalactites.

Ces phénomènes s'expliquent parfaitement si, partant de la première remarque faite ci-dessus, on considère que les premiers fendillements ont lieu quand les composés chimiques résultant de la décomposition du ciment par les éléments de l'eau de mer ont acquis un volume supérieur à celui des pores du mortier et les font éclater, de même que la dilatation de l'eau qui se congèle à l'intérieur des pierres poreuses les désagrège et en occasionne rapidement la destruction.

. Or les conditions pour que ce phénomène se produise sont : 1° que l'eau de mer puisse pénétrer la masse du mortier et s'y renouveler suffisamment pour en provoquer

d'une manière continue la décomposition chimique, et 2° qu'à un moment donné les produits de cette décomposition se trouvent réunis dans le mortier en quantité telle que la capacité de ses pores ne suffise plus à les contenir.

Il n'est donc pas étonnant qu'on n'observe aucune désagrégation : 1° dans les mortiers presque imperméables où l'eau se renouvelle difficilement; 2° dans les mortiers très perméables dont les pores sont relativement volumineux et d'où le courant rapide de l'eau qui les traverse chasse continuellement la plus grande partie des matières résultant de leur décomposition, matières qui viennent se déposer à leur surface.

Mais si ces derniers mortiers, au lieu d'être traversés par un courant continu d'eau de mer, sont immergés dans une eau tranquille, la majeure partie des produits de décomposition demeureront dans leurs pores et finiront par les remplir, et la désagrégation pourra avoir lieu.

Au contraire, pour les mortiers moins perméables exposés dans les mêmes conditions, il s'établira rapidement un équilibre de pression entre l'eau extérieure et celle qui les aura pénétrés, mais ensuite leur texture relativement serrée empêchera l'échange de se produire entre ces deux liquides, de sorte que, faute d'un renouvellement suffisant des éléments décomposants de l'eau de mer, ils résisteront bien mieux que sous l'action d'un courant les traversant.

Enfin on conçoit que, si tous les jours on maintient les cubes d'essai quelques heures à sec, pendant chacune de ces périodes, les plus perméables laisseront facilement échapper leur eau, entraînant avec elle une partie des matières dangereuses, ce qui retardera la désagrégation, tandis que les autres retiendront la leur par capillarité et, par suite, se comporteront à peu près comme s'ils restaient continuellement immergés.

Dans la pratique, il est rare que les mortiers se trouvent immergés dans de l'eau de mer absolument tranquille. En admettant même que les maçonneries soient abritées du mouvement des lames, comme c'est le cas pour les ouvrages intérieurs des ports, elles n'en restent pas moins soumises à l'action de la marée et subissent par ce fait des pressions extrêmement variables. L'équilibre de pression dont il vient d'être question ne peut donc arriver à s'établir, et on doit admettre que, tant que les mortiers ne sont pas absolument imperméables, ils sont constamment traversés par des courants continus ou alternatifs d'eau de mer.

Il y a donc lieu de croire que les accidents que l'on constate souvent dans les travaux maritimes obéissent à la loi qui nous a été révélée par les expériences de filtration et non à celle des blocs simplement immergés, de sorte que la désagrégation doit être maximum pour les mortiers à travers lesquels l'eau ne circule qu'avec une certaine difficulté.

D'ailleurs, en dehors de la question d'entraînement des produits de décomposition par un courant énergique, une autre considération tend encore à prouver qu'il en doit être ainsi, c'est que la perméabilité des mortiers dépend moins du volume total de leurs vides que des dimensions individuelles de ceux-ci, et qu'en général les mortiers moyennement perméables sont ceux dans lesquels l'eau est obligée de circuler à travers une multitude de canaux capillaires qui opposent une certaine résistance à son passage.

Il n'est pas étonnant que de pareils mortiers, tels que ceux de sable fin, dont la matière est réduite à un état d'extrême division, soient plus vite décomposés par l'eau de mer à laquelle ils présentent une surface d'attaque considérable, que d'autres dans lesquels l'eau circule plus librement à travers de larges cavités entre de petits

noyaux à peu près imperméables formés de gros grains de sable et de ciment pur (*).

Enfin il y a à tenir compte également des phénomènes dus à l'évaporation de l'eau restée dans les mortiers pendant les intervalles de marée basse.

Conclusion. — Malgré les résultats obtenus dans nos expériences et toutes ces considérations tendant à prouver qu'il faille préférer les mortiers très perméables à ceux qui ne le sont que moyennement, une pareille conclusion peut paraître paradoxale, et on conçoit que bien des ingénieurs hésiteraient à l'accepter. C'est qu'en réalité des mortiers très perméables ne seraient obtenus en général qu'avec des dosages très maigres en ciment, ce qui risquerait de compromettre leur résistance, et qu'en outre dans la pratique, en admettant même que, dans les premiers temps de la filtration, les produits de la décomposition du ciment puissent être entraînés par l'eau, ce qui d'ailleurs n'aurait sans doute pas lieu si

(*) Il n'est pas sans intérêt de citer à la suite de ces considérations les deux passages suivants empruntés à des mémoires déjà anciens.

« Que l'on batte du sable fin dans une caisse et du sable grossier dans une autre ; qu'on les imbibe d'eau et qu'on les expose ensuite à l'action de la gelée ; la surface du sable fin sera poussée en dehors par la gelée qui l'aura soulevée, tandis que dans la deuxième caisse, elle se sera fait jour à travers les graviers, et la surface sera restée plane. C'est là un effet dû à l'influence de la forme des cavités ». — Brard, *Ann. de Phys. et de Chim.*, XXXVIII, p. 160 (1828).

« C'est un fait d'expérience que les pierres à tissu poreux, à travers lesquelles l'eau filtre facilement, résistent en général beaucoup mieux aux alternatives d'un grand froid et d'une grande chaleur que les pierres dures et compactes, telles que les marbres par exemple. Lors donc qu'on a des enduits extérieurs à faire, il faut, même aux dépens de la dureté, tenir les mortiers très maigres, parce qu'ils imitent alors les pierres poreuses dans leur texture et en acquièrent la propriété. » — Vicat, *Ann. de Phys. et de Chim.* XV, p. 378 (1820).

L'analogie déjà signalée entre l'action des expansifs produits par l'eau de mer au contact du ciment et celle de la glace se formant dans les pores des pierres justifie ce rapprochement.

l'épaisseur de la maçonnerie était un peu considérable, ces mortiers finiraient toujours par se colmater plus ou moins et rentrer dans le cas de mortiers moins perméables. Aussi croyons-nous qu'il sera prudent d'en éviter l'emploi.

Mais si, sur ce point, nos conclusions ne sont pas conformes à celles qui résulteraient de l'interprétation rigoureuse des expériences, par contre, nous ne manquerons pas de tirer parti des indications que celles-ci nous fournissent touchant l'influence de l'état de division du ciment dans les mortiers.

Aussi, au lieu de chercher à envisager la désagrégation des mortiers comme une conséquence de leur porosité ou de leur perméabilité, considérons-nous qu'elle dépend avant tout de l'étendue de la surface d'attaque offerte par le ciment à l'eau de mer, et, comme nous venons de le dire, de l'état de division de celui-ci dans le mortier.

Dès lors nous concluons que la règle à suivre pour obtenir des mortiers les meilleures conditions de résistance à l'influence destructive de l'eau de mer sera d'éviter autant que possible l'emploi de sables contenant beaucoup de grains fins, et, au cas où l'on n'en aurait pas d'autres à sa disposition, d'augmenter la dose de ciment qu'on leur combine.

Toutefois on ne devra pas perdre de vue que, dans la plupart des cas, un mortier relativement maigre à gros sable est encore préférable à un mortier riche à sable fin.

Quant à exprimer ces conditions par quelque relation où entrent les volumes c , s , e , v , définis antérieurement et qui caractérisent la compacité des mortiers, il sera inutile de l'essayer, puisque, comme il vient d'être dit, la désagrégation d'un mortier dépend moins de la somme des volumes de ses pores que de l'étendue totale de leurs parois.

VIII. — RÉSISTANCES.

Utilité des essais de résistance. — La propriété caractéristique des mortiers étant de passer de l'état mou à l'état solide, leur dureté doit varier progressivement et ne tendre que peu à peu vers sa limite définitive. Aussi le procédé employé couramment pour reconnaître leur qualité consiste-t-il à déterminer, après des durées variées comptées à partir de la date de leur confection, les résistances qu'ils sont capables d'opposer à des efforts appliqués de diverses manières, et à étudier à la fois les valeurs absolues et la loi de progression de ces résistances.

Quant à tirer de ces essais des indications relatives à l'importance des efforts qu'ils seront capables de supporter réellement dans la pratique, il ne faut guère y compter, tant est grande la différence entre les conditions d'emploi et d'exposition des mortiers selon qu'on les étudie en petit par des expériences de laboratoire ou qu'on les considère en masses plus ou moins importantes dans les véritables maçonneries.

Aussi doit-on regarder les essais de résistance comme uniquement destinés à comparer des mortiers entre eux, soit qu'on veuille mettre en évidence les différences de qualité de divers ciments ou qu'on se propose de rechercher les meilleures conditions d'emploi d'un même produit.

On admet alors que deux mortiers auxquels les essais auront fait attribuer des résistances égales se comporteront sensiblement de la même manière dans la pratique, tandis que celui dont les résistances seraient supérieures devrait être d'un emploi plus avantageux.

C'est ainsi que, pour les épreuves imposées par les cahiers de charges, on s'est moins inquiété de faire en

sorte que les conditions d'essai se rapprochassent de celles des travaux à exécuter que de chercher des procédés d'expérimentation faciles à appliquer toujours identiques à eux-mêmes, de manière à rendre aussi précise que possible la comparaison des ciments à essayer avec ceux, déjà éprouvés par un emploi prolongé, ayant servi de base pour fixer les valeurs minimum des résistances à exiger.

Il est difficile de dire dans quelle mesure cette induction est justifiée, car on ne possède aucun moyen de la contrôler. Aussi sera-t-il prudent de n'en admettre les conséquences qu'autant que les conditions de fabrication des mortiers d'essai différeront peu de celles de la pratique, et qu'il n'y aura pas trop à craindre des causes perturbatrices dues à l'influence des milieux ambiants.

Durée de prise. — On appelle durée de prise d'une pâte de ciment pur le temps écoulé entre l'instant où cette pâte a été gâchée et celui où elle offre une certaine résistance à la pénétration d'une aiguille de forme et de poids déterminés. Cette résistance correspond à peu près à une dureté telle que la pâte puisse supporter sans déformation apparente la pression du doigt.

Pour la prise du mortier sableux, il est difficile d'adopter une définition du même genre, car nous avons vu (p. 38) que dans des mortiers ayant à peu près même consistance, une même aiguille chargée d'un même poids pouvait s'enfoncer à des profondeurs très différentes suivant la grosseur et la proportion du sable entrant dans leur composition.

Toutefois, même en s'en tenant au criterium assez vague de la pression du doigt, on constate des différences entre les durées de prise de mortiers faits avec un même ciment employé dans des conditions différentes.

Tout porte à croire que, de même que les pâtes de ciment pur prennent d'autant plus lentement que la proportion d'eau de gâchage est plus considérable, les mortiers sableux faits avec un même ciment mettent pour durcir un temps d'autant plus long qu'ils contiennent une plus forte proportion d'eau par unité de poids de ciment, et que par suite la rapidité de prise de mortiers de même consistance croît :

- 1° Avec leur richesse en ciment;
- 2° Avec la grosseur du sable entrant dans leur composition;
- 3° Avec la porosité du sable.

Variabilité des résistances. — Les mortiers dont la prise est la plus rapide et qui par suite ont tout au début de leur durcissement des résistances relativement élevées, ne sont pas forcément ceux qui ultérieurement devront atteindre la plus grande dureté. Il n'est pas rare, en effet, de voir l'ordre des résistances de plusieurs mortiers se renverser au bout d'une durée plus ou moins longue. Il est donc nécessaire d'attendre assez longtemps avant de se prononcer sur leurs valeurs relatives.

Cela entendu, nous allons passer en revue les principales influences modificatrices résultant de la composition des mortiers, en laissant de côté celles qui tiennent de la nature même du ciment employé (composition chimique, cuisson, finesse de mouture, âge du ciment, etc.) que nous avons déjà étudiées dans un travail antérieur (*).

Nature de l'eau de gâchage. — L'emploi de l'eau douce ou de l'eau de mer pour le gâchage des mortiers n'exerce

(*) Expériences concernant les ciments. *Annales des Ponts et Chaussées*, 6^e série, XIX, p. 313 (mars 1890).

pas une influence bien caractérisée sur leurs résistances finales. Suivant la provenance du ciment employé il peut y avoir avantage à se servir de l'un ou de l'autre des deux liquides.

Il n'en est pas de même en ce qui concerne la prise qui est toujours plus lente quand le mortier est gâché à l'eau de mer.

Proportion de l'eau de gâchage. — On a vu par la *fig. 4* qu'en général, à mesure qu'on augmente la proportion d'eau employée pour le gâchage, la valeur de $c + s$, d'abord croissante, passe par un maximum puis va en décroissant d'une manière continue.

Ainsi qu'on devait s'y attendre, il en est sensiblement de même des résistances, comme on peut s'en rendre compte par l'examen du tableau ci-contre qui reproduit quelques-unes de nos expériences. Pour chaque mortier n représente la proportion d'eau correspondant à la bonne consistance plastique.

POIDS DE SABLE mélangé à un poids 1 de ciment	COMPOSITION granulométrique du sable	VALEUR de n en fonction du poids de matière sèche	Proportion d'eau employée } =						
			0,7n	0,8n	0,9n	n	1,1n	1,2n	
2	$g=0,80$ $m=0,19$ $f=0,01$	11,9 p. 100	Volume réel de matière solide par litre de mortier } $c+s=$	0,694	0,715	0,726	0,717	0,702	0,700
			Volume d'eau par litre de mortier frais. } $e=$	0,160	0,189	0,216	0,236	0,256	0,278
			Résistance à la traction (moyenne de six briquettes) après exposition de :	kg	kg	kg	kg	kg	kg
			12 semaines dans l'eau de mer. . .	16,3	15,6	17,0	17,3	15,0	11,8
			1 an dans l'eau de mer.	18,3	19,1	17,4	17,8	17,9	15,8
			1 an à l'air.	41,0	42,0	37,6	41,5	40,8	37,7
			Résistance à la compression (moyenne de deux cubes) après exposition de :	kg	kg	kg	kg	kg	kg
			12 semaines dans l'eau de mer. . .	115	120	143	123	105	98
			1 an dans l'eau de mer.	138	168	170	183	135	143
			1 an à l'air.	213	240	293	240	195	165
1	$g=0,15$ $m=0,36$ $f=0,49$	19,7 p. 100	Volume réel de matière solide par litre de mortier. } $c+s=$	0,611	0,629	0,628	0,614	0,604	0,586
			Volume d'eau par litre de mortier frais. } $e=$	0,242	0,284	0,319	0,346	0,375	0,396
			Résistance à la traction (moyenne de six briquettes) après exposition de :	kg	kg	kg	kg	kg	kg
			12 semaines dans l'eau de mer. . .	18,8	16,8	20,5	18,0	17,8	17,4
			1 an dans l'eau de mer.	25,3	25,3	27,8	26,3	25,3	24,6
			1 an à l'air.	42,4	39,6	46,3	47,0	43,6	41,1
			Résistance à la compression (moyenne de deux cubes) après exposition de :	kg	kg	kg	kg	kg	kg
			12 semaines dans l'eau de mer. . .	128	135	150	128	105	95
			1 an dans l'eau de mer.	143	158	153	140	138	108
			1 an à l'air.	268	283	263	245	220	190
3	$g=0,15$ $m=0,36$ $f=0,49$	17,0 p. 100	Volume réel de matière solide par litre de mortier. } $c+s=$	sensiblement constant					
			Volume d'eau par litre de mortier frais. } $e=$	régulièrement croissant					
			Résistance à la traction (moyenne de six briquettes) après exposition de :	kg	kg	kg	kg	kg	kg
			12 semaines dans l'eau de mer. . .	13,1	13,4	11,6	11,2	9,6	9,9
			1 an dans l'eau de mer.	19,3	18,4	18,6	18,4	16,5	16,6
			1 an à l'air.	31,4	29,8	27,5	26,5	25,8	24,3
			Résistance à la compression (moyenne de deux cubes) après exposition de :	kg	kg	kg	kg	kg	kg
			12 semaines dans l'eau de mer. . .	60	61	54	40	41	35
			1 an dans l'eau de mer.	75	77	71	58	55	53
			1 an à l'air.	145	128	113	110	101	96

La difficulté qu'on éprouve à tasser également les mortiers trop secs explique les irrégularités trouvées pour quelques-uns de ces mortiers.

On constate que, de même que la somme $c + s$, la résistance atteint en général sa valeur maximum pour une consistance un peu plus sèche que la bonne consistance plastique, de sorte que, si l'on se borne à ne considérer que des mortiers dont la consistance diffère peu de cette dernière, leurs résistances seront d'autant plus faibles qu'ils auront été gâchés plus mou.

Étant donné la perméabilité relativement considérable des mortiers secs, il sera donc prudent de se tenir à une consistance voisine de la consistance plastique normale.

Nature du sable. — Nous n'avons encore fait que peu d'expériences en vue de rechercher l'influence de la nature du sable employé sur les résistances des mortiers. Une des difficultés de cette étude est qu'il faut amener les divers sables qu'il s'agit de comparer à avoir même composition granulométrique. Mais, même dans le cas où il en est ainsi, la forme des grains exerce aussi son influence. Enfin, vu les différences de densité et de tassement des différentes matières dont les sables peuvent être constitués, il n'est pas indifférent de doser les mortiers au poids, au volume réel ou au volume apparent, et les résultats varient suivant la méthode employée.

Pour l'expérience relatée ci-dessous, nous avons séparé les diverses matières étudiées en trois grosseurs de grains correspondant aux types G, M, F définis plus haut et mélangé ces trois grosseurs en proportions égales. Les mortiers, dosés à raison de 1 partie en poids d'un même ciment pour 3 parties en poids de sable, contenaient donc des poids égaux de ciment et de chacune des trois grosseurs de grains sableux. Ils ont été gâchés avec des proportions d'eau de mer déterminées par l'expérience

de telle sorte que chacun d'eux eût la bonne consistance plastique normale, puis immergés à l'eau de mer après séchage d'une semaine à l'air. Les nombres relatés au tableau représentent les résistances à la traction (moyennes de 5 briquettes de 5 centimètres carrés) après des durées d'immersion de douze semaines et d'un an. D'autres briquettes identiques seront rompues après des durées d'immersion beaucoup plus longues.

Les matières employées ont été choisies de manière à permettre soit de comparer entre eux des sables provenant de diverses roches naturelles (A à K) ou même des sables de même nature mais à grains de formes différentes (K, L, M), soit de rechercher l'influence spéciale de certains éléments des roches (T, U, V) ou d'impuretés pouvant se rencontrer dans les sables (A', B') ou encore de substances passant pour avoir la propriété d'augmenter les résistances ou simplement soupçonnées telles (P, Q, W, Y, Z, C', D'), soit enfin de comparer à des matières certainement inertes (K, N) d'autres matières qui par leur constitution physique ou chimique peuvent donner lieu à des études théoriques présentant quelque intérêt (O, R, S, X).

DÉSIGNATION abrégée des matières	NATURE DES MATIÈRES MÉLANGÉES AU CIMENT	DÉCOMPOSITION DU POIDS de 1 litre de mortier frais				RÉSISTANCE à la traction par centimètre carré après		
		Ci- ment	grains			Eau de mer	12 se- maines	1 an
			G	M	F			
		gr.	gr.	gr.	gr.	gr.	kg	kg
A	Porphyre de Belgique	493	493 A	493 A	493 A	296	22,5	27,6
B	Granit jaune de Brest	460	460 B	460 B	460 B	305	18,4	24,8
C	Grès d'Arras	470	470 C	470 C	470 C	292	15,0	21,5
D	Grès ferrugineux des environs de Calais (bisette)	512	512 D	361 D + 151 K	512 D	307	15,8	23,8
E	Pierre silicéo-calcaire (environ 50 p. 100 de calcaire) du Portel, près Boulogne.	482	482 E	482 E	482 E	300	18,9	24,5
F	Marbre de Marquise (stinkall).	482	482 F	482 F	482 F	289	23,6	39,5
G	Craie	384	384 G	384 G	384 G	407	11,6	14,6 (1)
H	Coquillages écrasés	477	477 H	477 H	477 H	285	20,9	27,0
I	Silex	472	472 I	472 I	472 I	283	20,1	30,8
J	Schiste	434	434 J	434 J	434 J	391	15,5	17,3 (2)
K	Quartzite de Cherbourg moulu (grains an- guleux), MATIÈRE ÉTALON	487	487 K	487 K	487 K	292	22,9	25,7
L	Quartzite de Cherbourg obtenu comme ré- sidu de la fabrication des matériaux d'empierrement (grains lamelleux)	465	465 L	465 L	465 L	298	15,3	20,5
M	Quartzite de Cherbourg écrasé au pilon (grains plus arrondis que K)	488	488 M	488 M	488 M	293	20,1	27,5
N	Verre pilé	483	483 N	483 N	483 N	290	17,7	35,4
O	Pierre ponce	220	220 O	220 O	220 O	413	10,1	12,4
P	Briques neuves pilées	467	467 P	467 P	467 P	355	22,6	37,0
Q	Mâchefer	470	470 Q	470 Q	470 Q	338	22,3	31,1
R	Laitier granulé servant à la fabrication du ciment de laitier	434	434 R	434 R	434 R	347	22,5	22,6
S	Charbon de bois (mortier plus léger que l'eau)	138	138 S	138 S	138 S	424	3,3	3,5
T	Feldspath (contenant un peu de quartz, mais exempt de mica)	479	479 T	479 T	479 T	287	22,7	25,8
U	Mica	479	479 K	441 K + 38 U	479 K	287	18,8	25,3
V	Pyrite (marcassite pulvérisée)	495	495 K	495 K	433 K + 62 V	297	22,3	27,5
W	Trass de Hollande	431	431 K	431 K	431 W	329	29,6	34,5
X	Roches de ciment concassées	514	514 X	514 X	514 K	293	25,2	32,9
Y	Bioxyde de manganèse pulvérisé	496	496 K	496 K	496 Y	298	16,8	19,1
Z	Sciure de bois	419	419 K	377 K + 42 Z	377 K + 42 Z	336	11,1	15,5
A'	Argile séchée et pulvérisée	461	461 K	461 K	461 A'	331	11,2	16,5
B'	Vase séchée contenant des matières orga- niques	447	447 K	447 K	447 B'	303	11,6	16,5
C'	Cendre de houille	399	399 K	399 K	399 C'	446	16,6 (3)	25,4
D'	Cendre de bois	438	438 K	438 K	438 D'	368	19,6	24,0
S'	Charbon de bois (1 ciment + 1 charbon) . .	363	121 S	121 S	121 S	404	8,8	11,6

(1) Fissures colmatées mais parfaitement nettes sur toutes les briquettes.

(2) Très légères veines colmatées à la surface de quelques briquettes.

(3) Efflorescences dès le premier jour de séchage. Les briquettes ne tardent pas à se fendiller.

Résistances à la compression par centimètre carré après immersion d'un an à l'eau de mer (moyennes de deux cubes).

Mêmes mortiers que ci-dessus.	}	Mortier K (quartzite anguleux), résistance = 155 ^{kg}	
		Id. L (quartzite lamelleux), id. = 95	
		Id. P (brique), id. = 128	
		Id. A' (argile), id. = 95	

Étude spéciale de la suite des résistances du mortier K.
(Immersion à l'eau de mer après séchage d'une semaine à l'air.)

	AGES DES MORTIERS LORS DES RUPTURES					
	1 sem.	4 sem.	12 sem.	26 sem.	1 an	2 ans
Résistances à la traction par centimètre carré (moyennes de cinq briquettes).	14,0	17,4	22,9	26,2	25,7	25,4
Résistances à la compression par centimètre carré (moyennes de deux cubes).	65	83	103	118	155	185

Sans nous arrêter à la discussion détaillée de ces nombres qui serait forcément assez longue, remarquons que pour ce genre d'expériences le dosage des mortiers au poids présente l'inconvénient que, en raison des différences considérables trouvées pour les proportions d'eau nécessaires aux gâchages, les poids de matières solides et par suite de ciment entrant dans un même volume de mortier sont sujets à de fortes variations qui rendent souvent difficile la comparaison des résistances. Nous avons entrepris depuis peu de nouvelles expériences dans lesquelles nous nous sommes efforcé d'éviter cet inconvénient, mais qui ne sont pas encore assez avancées pour pouvoir être citées utilement dans ce mémoire.

Nous n'abandonnerons pas ce chapitre sans rappeler les intéressantes expériences faites par M. Alexandre sur le même sujet (*) et rapprocher de ses conclusions relatives à la supériorité des sables calcaires les excellents

(*) *Annales des Ponts et Chaussées*, 6^e série, XX, p. 319 (septembre 1890).

résultats trouvés ci-dessus pour le marbre de Marquise et au contraire les faibles résistances et les fendillements que nous avons constatés pour les mortiers de craie.

Composition granulométrique du sable. — La *fig. 25* représente la variation des résistances à la compression après exposition de neuf mois à l'air puis immersion de trois mois à l'eau de mer, de mortiers dosés à raison d'une partie en poids d'un même ciment pour trois parties en poids de mélanges variés des trois grosseurs étalons de sable quartzeux. On voit que, suivant la composition granulométrique du sable, les résistances ont varié du simple à plus du triple. La comparaison de ce diagramme avec celui de la *fig. 32* montre que la loi de variation des résistances diffère peu de celle des volumes réels de matière solide et qu'en particulier le maximum a encore lieu pour un sable exempt de grains moyens.

Les *fig. 73 à 80* représentent de même la loi de variation des résistances à la compression de deux séries de mortiers composés d'un même ciment et de divers mélanges des sables étalons G, M, F, et dosés les uns à raison de 250 kilogrammes, les autres à raison de 500 kilogrammes de ciment par mètre cube de sable. Que les résistances aient été déterminées après immersion de douze semaines ou d'un an à l'eau de mer, après immersion d'un an à l'eau douce ou exposition d'un an à l'air, toujours la loi est restée la même, bien que les nombres trouvés aient différé suivant les conditions d'exposition; les résistances ont varié environ du simple au triple en atteignant leur maximum pour un certain mélange de grains G et de grains F, mélange dont la composition diffère suivant la richesse des mortiers.

La teinte grise étendue le long de l'arête GM de certains de ces diagrammes correspond à des mortiers qui se sont recouverts d'efflorescences (teinte légère) ou se sont

plus ou moins fissurés (teinte de plus en plus foncée sur la *fig. 75*) ainsi qu'il a été expliqué plus haut au chapitre des perméabilités.

Richesse du mortier. — De même que des mortiers de même dosage peuvent atteindre des résistances très différentes suivant la composition du sable ayant servi à les fabriquer, la loi suivant laquelle les résistances augmentent avec la proportion de ciment entrant dans un même poids total de mélange dépend aussi de la nature du sable.

Si l'on considère une série de mortiers faits avec un même sable et pour lesquels le poids de ciment entrant dans l'unité de poids de mélange sec croisse uniformément de 0 à 1, on constate que, tandis qu'avec les sables fins l'augmentation des résistances est à peu près uniforme depuis le commencement jusqu'à la fin de la série, au contraire avec les sables contenant des proportions notables de gros grains, les résistances croissent d'abord très vite et atteignent assez rapidement des valeurs voisines de celles correspondant au ciment pur.

Il n'y a donc guère intérêt avec de pareils sables à employer des mortiers dont la richesse en ciment dépasse une certaine limite. Il arrive même souvent que des mortiers riches aient des résistances supérieures au ciment pur.

Nous avons tracé sur la *fig. 17* des courbes représentant la série des résistances à la traction et à la compression atteintes après immersion de deux mois à l'eau de mer par les mortiers de tous dosages confectionnés avec un même ciment et les sables P et Q précédemment étudiés. On voit que, tandis que les résistances à la traction diffèrent peu d'un sable à l'autre, celles à la compression, qui, comme nous le reconnaitrons plus loin, donnent la mesure la plus exacte de la dureté des mor-

tiers, suivent à peu près les allures qui viennent d'être indiquées pour les sables fins (P) et les gros sables (Q).

Les courbes de la *fig. 18*, qui correspond plus spécialement aux mortiers les plus souvent employés, montrent mieux la supériorité des mortiers de gros sable.

Dans d'autres expériences, nous avons fait varier à la fois la proportion du ciment et la composition granulométrique du sable. Représentant alors le ciment et les trois sables élémentaires G, M, F par les quatre sommets d'un tétraèdre régulier, nous avons tracé dans ce tétraèdre des surfaces de niveau, lieux des points représentatifs de tous les mortiers ayant donné même résistance après une durée déterminée.

La *fig. 10* représente la projection sur le plan G, M, F des trois faces latérales du tétraèdre, avec les traces des surfaces de niveau sur ces trois faces. Elle correspond aux résistances à la compression atteintes après exposition de neuf mois à l'air puis immersion de trois mois dans l'eau de mer par des mortiers de divers dosages faits avec un même ciment et les trois sables quartzeux étalons G, M, F.

On voit qu'en général plus le sable est gros, moins il est nécessaire de lui combiner de ciment pour obtenir une résistance déterminée.

L'expérience, répétée avec des sables G, M, F, résultant du concassage de coquillages, a donné des résultats analogues.

Relation entre la compacité et les résistances. — Il est évident que, tandis que lorsqu'il s'agit de déterminer les proportions des pleins et des vides dans un mortier qui vient d'être gâché, on peut sans commettre une bien grosse erreur admettre que le résultat ne change pas quand on remplace des grains de ciment par des grains égaux de sable ou réciproquement, il ne peut plus en être

de même lorsqu'il s'agit des résistances atteintes par le mortier après une durée quelconque, puisque dans ce cas le ciment est le seul élément actif.

Il ne faudrait pas croire pourtant que des mortiers qui à volume égal contiendraient une même quantité d'un même ciment, doivent nécessairement atteindre la même résistance au bout d'une même durée de durcissement. C'est ce que montre le tableau ci-dessous qui donne les résistances de mortiers faits avec des mélanges sableux de compositions granulométriques différentes additionnés de proportions d'un même ciment telles que la quantité de ciment entrant dans un litre de mortier frais fut sensiblement la même.

Composition du mortier en volumes réels.	Poussière de ciment passant au tamis de 5 000 mailles par centimètre carré	2,46	2,40	2,35	2,10	1,94	1,82	1,74
	Poussière de sable quartzeux passant au tamis de 5 000 mailles par centimètre carré	5,54	4,60	3,65	2,90	2,06	1	0,26
	Gros grains de quartzite passant à l'anneau de 7 ^{mm} ,5 de diamètre et retenus par l'anneau de 5 ^{mm} de diamètre	0	1	2	3	4	5	6
Volume réel de ciment contenu dans 1 litre de mortier frais	0,158	0,161	0,166	0,160	0,160	0,160	0,162	
Résistance à la compression après immersion de 1 an à l'eau de mer	70 ^{kg}	77 ^{kg}	96 ^{kg}	98 ^{kg}	121 ^{kg}	160 ^{kg}	180 ^{kg}	

Dès lors, la compacité du mortier exerce aussi une influence et on doit se demander suivant quelle loi les résistances atteintes après une même période dépendent des volumes réels occupés respectivement dans le mortier par le ciment, le sable, l'eau et les vides.

C'est ce que nous avons essayé d'établir.

Pour commencer par le cas le plus simple, il était naturel de rechercher d'abord comment varie la résistance de mortiers ayant exactement même compacité et ne différant que par la proportion de matière active entrant dans un même volume de chacun d'eux.

Nous avons réalisé cette condition, tout en supprimant

les causes d'erreurs qui auraient pu provenir de l'inertie partielle des gros grains de ciment, en confectionnant avec divers mélanges sableux et de la fine poussière de ciment passant au tamis de 5.000 mailles par centimètre carré, des mortiers dans lesquels nous remplacions successivement des fractions variables du ciment par des volumes réels égaux de sable inerte de même grosseur. Grâce à cet artifice la proportion d'eau nécessaire pour le gâchage a très peu varié, de sorte que les volumes et la répartition des pleins et des vides ont été sensiblement les mêmes pour tous les mortiers d'une même série.

Nous avons fait ainsi plusieurs séries de mortiers de compositions différentes dont nous avons déterminé après diverses durées d'exposition dans l'eau de mer ou à l'air les résistances à la traction et à la compression.

Il serait superflu de relater ici le détail des résistances obtenues; nous nous contenterons de donner dans le tableau ci-dessous les moyennes de toutes les séries réunies, de manière à mieux faire ressortir la loi générale qu'il s'agit d'établir. Nous avons représenté par 1 la proportion de ciment contenue dans le mortier le plus riche de chaque série.

	PROPORTION DE CIMENT entrant dans les mortiers				
	0	1/4	1/2	3/4	1
Moyenne des résistances à la traction (41 séries). . . .	0	15,5	22,4	27,0	31,5
Id. à la compression (73 séries).	0	62	125	184	230

L'examen de ce tableau et de la *fig. 19* qui en est la traduction graphique, montre que l'accroissement des résistances à la traction est moins rapide que celui des quantités de ciment entrant dans un même volume de mortier. Quant aux résistances à la compression, on peut dire qu'elles sont proportionnelles à ces quantités

de ciment, car on voit que les points correspondants sont sensiblement sur une droite passant par l'origine.

Or, si l'on se reporte au mémoire (*) dans lequel M. l'ingénieur en chef Durand-Claye a démontré que l'expérience par compression donne rigoureusement la mesure de la résistance au cisaillement, c'est-à-dire aux efforts tranchants, tandis que les essais par traction ne fournissent qu'une somme assez complexe des tensions très différentes que subissent à l'instant de la rupture les divers points de la section minimum des briquettes, on est amené à mesurer la dureté des mortiers par les nombres obtenus dans les essais de compression et dès lors à conclure des résultats relatés par la *fig. 19* que les duretés de mortiers *de même compacité* sont proportionnelles aux quantités de matière active qu'ils contiennent.

D'ailleurs, quel que soit le ciment employé, la quantité de matière active contenue après un temps déterminé peut être représentée par une certaine fraction α , croissant avec le temps, du volume réel c occupé par le ciment dans un litre de mortier. On a donc pour tous les mortiers faits avec un même ciment $R = \alpha c f(s, e, v)$, R représentant la résistance à la compression et f une certaine fonction des trois volumes s, e, v , définis antérieurement, fonction qu'on pourra essayer de déterminer en étudiant comment le rapport $\frac{R}{c}$ varie avec s, e et v pour des mortiers de même ciment essayés après une même durée ($\alpha =$ constante).

A la suite de quelques tâtonnements, nous sommes arrivé à reconnaître que la résistance à la compression après une durée déterminée est à peu près proportionnelle au rapport $\frac{c}{e+v}$ ou $\frac{c}{1-(c+s)}$ du volume réel du

(*) *Annales des Ponts et Chaussées*, 6^e série, XVI, p. 173 (août 1888).

ciment au volume non occupé par la matière solide.

On vérifie cette loi en calculant les valeurs du rapport $\frac{c}{e + v}$ pour divers mortiers confectionnés avec un même ciment et construisant un diagramme ayant pour abscisses ces valeurs et pour ordonnées correspondantes les résistances à la compression obtenues après une même durée de conservation des mortiers dans des conditions identiques. On constate ainsi que tous les points se trouvent répartis dans le voisinage d'une droite passant par l'origine des coordonnées.

C'est ainsi qu'a été construite la *fig. 20* qui correspond aux résistances atteintes après immersion de deux mois à l'eau de mer par les divers mortiers aux sables P et Q déjà cités (*).

De nombreuses expériences nous ont montré que cette loi était générale et s'appliquait, dans la limite de son approximation, à tous les mortiers qu'on peut obtenir avec un même ciment et une même nature de sable, soit qu'on fasse varier la composition granulométrique du sable, la forme de ses grains, la proportion du ciment ou la consistance du mortier.

En particulier l'exemple ci-dessous montre que, pour des mortiers de dosages très différents, puisque les poids de ciment combinés à un même poids de sable pris pour unité y varient de 0,450 à 2,070, soit environ dans le rapport de 1 à 4 1/2, mais composés de telle sorte que les valeurs du rapport $\frac{c}{e + v}$ soient à peu près les mêmes pour tous mortiers, les résistances obtenues après expo-

(*) Dans ce cas particulier et dans beaucoup d'autres on remarque que le lieu des points, au lieu d'être rigoureusement une droite passant par le point O, a plutôt la forme d'une courbe passant par le même point et légèrement concave vers la direction des résistances croissantes, ou encore d'une droite coupant l'axe des abscisses un peu à droite de l'origine. Toutefois l'écart n'est jamais bien considérable et nous le négligerons jusqu'à plus ample connaissance de la loi.

sition dans des conditions identiques ont été sensiblement égales entre elles.

D'ailleurs, pour tenir compte de l'influence des légères différences existant entre les valeurs du rapport $\frac{c}{e+v}$, on a calculé dans l'avant-dernière colonne du tableau les quotients de la résistance trouvée pour chaque mortier par la valeur de $\frac{c}{e+v}$ correspondante, et dans la dernière colonne les écarts de ces quotients avec leur moyenne 438. L'écart moyen, égal à ± 18 , n'atteint qu'environ 4 p. 100 de la valeur de cette moyenne, ce qui montre bien la concordance des résultats. En outre, on n'aperçoit aucune loi entre la grandeur et le signe des écarts d'une part, et de l'autre la composition granulométrique des mélanges sableux ou quelque'une des autres données de l'expérience.

NUMÉROS D'ORDRE des mortiers	COMPOSITION du sable en poids (quartzite concassé tamisé aux grosseurs G M F et remélangé dans les proportions indiquées)			POIDS DE CIMENT combiné à un poids 1 de mélange sableux	POIDS D'EAU employé pour le gâchage d'un poids 100 de matière sèche (sable + ciment)	VALEUR trouvée pour le rapport $\frac{c}{e+v}$	RÉSISTANCE à la compression par centimètre carré après immersion d'un an à l'eau de mer	R $\left(\frac{c}{e+v}\right)$	R $\left(\frac{c}{e+v}\right) - 438$
	G	M	F						
I	13	1	1	0,450	11,7	0,764	348 ^{kg}	455	+17
II	10	4	1	0,540	13,2	0,732	302	413	-25
III	10	1	4	0,680	15,3	0,750	340	454	+16
IV	7	7	1	0,690	14,8	0,765	355	464	+26
V	7	4	4	0,755	16,4	0,733	306	417	-21
VI	7	1	7	0,940	18,3	0,739	333	432	+14
VII	4	10	1	0,800	16,3	0,759	325	430	-8
VIII	4	7	4	1,005	18,1	0,795	346	436	-2
IX	4	4	7	1,320	20,2	0,790	350	443	+5
X	4	1	10	1,250	21,1	0,731	346	472	+34
XI	1	13	1	1,030	17,9	0,796	337	425	-13
XII	1	10	4	1,170	19,2	0,782	344	446	-2
XIII	1	7	7	1,440	20,6	0,804	338	420	-18
XIV	1	4	10	1,740	21,7	0,824	347	422	-16
XV	1	1	13	2,070	22,8	0,825	356	431	= 7
Moyenne =								438	
Écart moyen =									± 18

La généralité de la loi étant admise, si, négligeant quelques écarts sans grande importance, on considère comme rigoureusement exacte la formule $R = K \frac{c}{e + v}$ dans laquelle K représente un coefficient dépendant surtout de la nature du ciment ainsi que des conditions et de la durée de conservation des mortiers au moment de la rupture, on pourra tirer de cette formule diverses indications intéressantes permettant de prévoir et de comparer les qualités de certaines séries de mortiers.

Nous allons passer en revue quelques-unes des principales applications de cette formule.

Mortiers faits avec un même ciment et un même sable.
— Nous avons vu plus haut (p. 52, *fig.* 17 et 18) comment on pouvait comparer par la méthode graphique les divers éléments qui caractérisent la compacité de tous les mortiers obtenus en combinant en proportions variables un même ciment et un même sable.

Admettant que le rapport $\frac{c}{e + v}$ mesure les duretés acquises par ces mortiers après une même durée, on pourra maintenant prendre pour abscisses les valeurs de $\frac{c}{e + v}$ et porter en ordonnées tel ou tel des nombres fournis directement par la mesure des compacités et notamment le dosage correspondant à chaque valeur de $\frac{c}{e + v}$ et le prix de revient du mètre cube de mortier. Les courbes obtenues, de plus en plus ascendantes à mesure qu'on considérera des valeurs plus élevées de $\frac{c}{e + v}$ (*fig.* 21), montreront qu'à partir d'une certaine richesse la qualité du mortier ne pourra être un peu améliorée qu'au prix d'un énorme surcroît de dépense, et par suite permet-

tront de fixer une limite pratique aux dosages à employer.

Choix d'un sable. — Si dans un chantier on a le choix entre plusieurs sables, il sera utile de déterminer les compacités des séries de mortiers qu'on pourra faire avec chacun d'eux et un même ciment, et notamment les courbes dont il vient d'être question relatives au prix du mètre cube de mortier. Dès lors, si l'on peut admettre qu'aucun des sables comparés n'exerce sur le ciment une action capable de modifier le facteur K de la formule, il suffira de tracer ces courbes sur un même diagramme ayant pour abscisses la suite des valeurs de $\frac{c}{e+v}$ et dont l'examen montrera immédiatement quel sable il sera le plus avantageux d'employer pour obtenir un mortier correspondant à une valeur donnée de ce rapport.

La *fig. 21* a été établie d'après ce principe en admettant les données suivantes :

Ciment . .	{	Poids spécifique dans l'eau (voirp. 51) . . . =	3,10
		Prix de la tonne au moment de l'emploi . . =	60 ^f ,00
Sable P. .	{	Poids spécifique =	2,65
		Poids du mètre cube =	1.535 ^{kg}
		Prix du mètre cube au moment de l'emploi. =	1 ^f ,00
Sable Q. .	{	Poids spécifique. =	2,61
		Poids du mètre cube. =	1.668 ^{kg}
		Prix du mètre cube au moment de l'emploi. =	{ 1 ^f ,00 6 ^f ,00

et négligeant le prix de la main-d'œuvre exigée pour la confection d'un mètre cube du mortier, attendu qu'on peut le considérer comme indépendant de la composition de ce dernier.

Elle montre que, tant qu'il ne s'agit que d'obtenir des mortiers d'égale résistance, le sable Q, même quand on suppose son prix beaucoup plus élevé, est encore plus économique que le sable P, par suite de la plus grande proportion de ciment qu'il faut combiner à ce dernier pour obtenir un même degré de résistance.

Comparaison de sables de diverses compositions granulométriques. — On peut d'ailleurs, en se reportant à la *fig.* 34 qui donne les valeurs de $c + s$ pour un mortier de composition granulométrique quelconque gâché à bonne consistance plastique, calculer approximativement les valeurs de $\frac{c}{e+v}$ correspondant aux mortiers de tous dosages qu'on peut faire avec les sables de n'importe quelle composition granulométrique, et par suite déterminer les proportions de ciment qu'il convient de combiner à ces divers sables pour obtenir des mortiers pour lesquels le rapport $\frac{c}{e+v}$ ait une même valeur.

C'est ainsi qu'a été établie la *fig.* 38 indiquant les poids de ciment qu'il est nécessaire de combiner à un poids 1 de chaque sable pour que, pour tous les mortiers obtenus en gâchant les mélanges à bonne consistance plastique, on ait $\frac{c}{e+v} = 0,500$.

La *fig.* 39, construite en tenant compte des différences de poids du mètre cube de chaque sable (voir *fig.* 23), représente la loi de variation des mêmes dosages exprimés en poids de ciment par mètre cube de sable. On voit par ces deux figures combien la quantité de ciment à employer varie suivant la composition du sable, et par suite quel intérêt pratique il peut y avoir à bien choisir ce dernier.

En construisant des figures analogues pour d'autres valeurs de $\frac{c}{e+v}$, on constate que les écarts entre les diverses proportions de ciment correspondant à une même valeur de ce rapport sont d'autant plus forts que cette valeur est elle-même plus élevée, de sorte qu'avec certains sables fins on ne peut obtenir de résistances relativement fortes qu'à condition de leur combiner des proportions de ciment considérables.

Comparaison de sables ou de ciments. — Les diverses considérations qui viennent d'être développées montrent comment la formule $R = K \frac{c}{e + v}$ peut renseigner *a priori* sur les qualités relatives de mortiers faits avec un même ciment et des sables inertes ou de même nature. La même formule fournit un moyen assez commode de comparer des sables de natures différentes ou d'étudier l'influence de sables ou de toutes autres matières qu'on soupçonnerait exercer une action quelconque sur le ciment. Il suffira, en effet, de confectionner avec un même ciment et chacun de ces sables, ainsi qu'avec un sable inerte choisi comme terme de comparaison, des séries de mortiers qu'on exposera dans des conditions identiques et qu'on essayera à la compression après une même durée de durcissement. A chaque série de mortiers faits avec une même matière correspondra une certaine valeur du coefficient K, qui, comparée à celle obtenue avec le sable étalon, montrera si la matière essayée exerce sur la résistance des mortiers une influence particulière.

La même méthode permettra de mesurer les valeurs de K correspondant après une même durée de durcissement à des mortiers composés d'un même sable inerte et de différents ciments, et par suite de comparer l'énergie acquise après cette durée par les divers échantillons soumis à l'expérience.

De même la variation des valeurs que prend le coefficient K pour une même série de mortiers à sable inerte suivant qu'on les expose dans différents milieux et qu'on les y laisse pendant des durées de plus en plus prolongées, devra donner une idée assez exacte de l'allure de durcissement du ciment entrant dans ces mortiers.

Il y a même lieu de croire que, soit qu'on veuille comparer divers ciments ou qu'on se propose de suivre le durcissement d'un échantillon particulier, si l'on arrive

à déterminer K avec une précision suffisante, les renseignements obtenus ainsi par l'étude de quelques mortiers de dosages quelconques gâchés à peu près à la consistance qu'on leur donne ordinairement sur les chantiers, auront de sérieux avantages sur ceux que l'on déduit actuellement des résistances d'éprouvettes de ciment pur ou d'un mortier sableux tout spécial gâché avec peu d'eau et comprimé énergiquement.

D'une part la mesure du coefficient K n'exigera pas l'emploi de mortiers de composition rigoureusement fixée d'avance et par suite souvent difficiles dans la pratique des laboratoires à obtenir parfaitement identiques au type proposé; on pourra au contraire confectionner des mortiers plastiques quelconques d'une manipulation commode se tassant d'eux-mêmes uniformément dans les moules et dont il suffira de mesurer soigneusement la compacité pour en déduire la valeur du rapport $\frac{c}{e+v}$ correspondante. Peu importera d'ailleurs que ce rapport n'ait pas les mêmes valeurs pour les divers mortiers d'essai, pourvu qu'on les connaisse exactement.

D'autre part, en partant de la valeur trouvée pour K à une certaine période avec un mortier quelconque, on pourra calculer la résistance qu'on aurait obtenue à la même période avec tout autre mortier où entre le même ciment, pourvu qu'on en connaisse la compacité.

Il semble donc qu'il doive être avantageux de substituer à la recherche des résistances atteintes après diverses périodes par un ciment gâché à l'état pur ou sous forme de mortier sableux normal, l'étude des valeurs du coefficient K qui permet de mesurer le degré de dureté acquis après les mêmes périodes par tout mortier confectionné avec ce ciment.

Il serait d'ailleurs à peu près impossible de déduire K des essais de résistance actuels au ciment pur ou au

mortier sableux normal, car, bien que ces mortiers soient exactement définis par les cahiers de charges, leur compacité, loin d'être constante, dépend de la nature du ciment employé, de la proportion d'eau avec laquelle on le gâche et du tassement plus ou moins fort imprimé aux mortiers d'épreuve.

Toutefois il serait prématuré d'opérer dès maintenant cette réforme des procédés d'essai, car la détermination de la compacité d'un mortier est une opération assez délicate exigeant certaines précautions dans le remplissage de la jauge dont on doit peser le contenu, en même temps que la mesure de deux poids spécifiques, ce qui rend la méthode d'une application bien difficile pour la plupart des laboratoires de chantier. En outre, il ne faut pas oublier que la formule $R = K \frac{c}{e + v}$ que nous avons adoptée paraît ne représenter que d'une manière approximative la loi suivant laquelle les résistances varient avec la compacité des mortiers.

Les écarts constatés proviennent-ils d'erreurs commises dans la détermination de la compacité, sont-ils dus à un défaut de sensibilité des appareils de rupture ou doit-on les attribuer à une légère inexactitude de la formule? Il est probable que les trois causes interviennent simultanément. Mais en admettant que la formule adoptée ne soit pas l'expression la plus rigoureuse de la loi, une modification quelconque de cette formule n'altérerait en rien le principe et l'utilité des conclusions à en déduire et, quand même on n'arriverait pas à en augmenter la précision, son degré d'approximation actuel serait déjà très suffisant pour qu'on puisse en tirer des indications intéressantes.

Aussi avons-nous entrepris de nombreuses expériences tant en vue de vérifier et s'il y a lieu de corriger la relation déjà établie, que dans le but de l'utiliser

comme il a été exposé ci-dessus à l'étude comparée de séries de sables et de ciments ainsi qu'à des recherches se rattachant à diverses autres questions.

IX. — VUES D'ENSEMBLE ET CONCLUSIONS.

Résumé. — Nous étant proposé d'étudier dans ce mémoire les modifications dont les diverses qualités des mortiers sont susceptibles, abstraction faite de celles qui résultent de différences dans la nature ou la qualité des agglomérants employés, nous avons commencé par proscrire de nos recherches l'emploi de sables calibrés purs, pour y suppléer des méthodes basées sur la considération de ce que nous avons appelé la composition granulométrique des sables ainsi que sur des constructions graphiques appropriées.

D'autre part, nous avons défini la compacité des mortiers au moyen de certains paramètres que nous avons appris à déterminer et dont nous avons comparé les variations à celles des propriétés étudiées.

Dès lors les principales conclusions obtenues, soit qu'elles fussent complètement nouvelles ou que, déjà plus ou moins connues, elles aient été précisées ou simplement confirmées par nos expériences, ont été les suivantes :

a. Le dosage des mortiers peut, si l'on n'y prend garde, varier énormément suivant les conditions dans lesquelles le sable et le ciment sont mesurés. En particulier on constate qu'un sable humide se tasse bien moins que le même sable sec et par suite donne, à volume égal, des mortiers notablement plus riches. De même il y a lieu de tenir compte de l'influence des cailloux que le sable peut contenir.

b. La quantité d'eau qu'il est nécessaire d'ajouter au mélange sec de sable et de ciment pour obtenir un mor-

tier de bonne consistance plastique varie suivant la nature du sable et du ciment employés et suivant les proportions de ces deux matières. Elle augmente avec la finesse du sable et la richesse du mortier et est à peu de chose près égale à la somme de quatre termes respectivement proportionnels aux quantités de ciment, de gros sable, de sable moyen et de sable fin entrant dans la composition du mortier.

c. Connaissant la composition granulométrique d'un sable et la proportion de ciment qu'on lui combine, on peut prévoir approximativement, en se reportant à des constructions graphiques établies d'avance, quelle sera la compacité du mortier obtenu.

d. Parmi tous les mortiers de même consistance qu'on peut obtenir avec des proportions variables d'un même sable et d'un même ciment, celui qui contient par unité de volume le plus grand volume absolu ($c + s$) de matières solides est sensiblement celui dans lequel le volume absolu des grains fins, ciment compris, est égal à la moitié du volume absolu des gros grains et des grains moyens réunis.

Le volume étudié ($c + s$) est d'ailleurs d'autant plus faible que le rapport de la proportion des grains fins à celle des autres diffère plus de celui (sensiblement $1/2$) qui correspond au maximum.

Il en résulte que, si à divers sables on combine des proportions croissantes d'un même ciment, pour tous ceux qui contiennent moins de $1/3$ de grains fins le volume $c + s$ commence par augmenter, passe par un maximum, puis décroît ensuite, tandis que pour les autres, il va toujours en décroissant.

e. A proportion égale de grains fins, ciment compris, le volume $c + s$ est d'autant plus considérable que la proportion des gros grains est plus grande par rapport à celle des grains moyens.

Il passe par un maximum d'environ 0,75 quand, la proportion des grains moyens étant nulle, le mélange contient environ 0,4 de gros grains.

f. Si l'on fait varier la proportion d'eau employée pour le gâchage d'un mortier sans toutefois trop s'écarter des consistances ordinaires de la pratique, on constate qu'en général le volume absolu de matières solides contenu dans l'unité de volume de mortier décroît en même temps que la proportion d'eau de gâchage augmente.

Les variations du volume absolu des matières solides, du volume de l'eau et du volume des vides sont d'ailleurs sensiblement proportionnelles entre elles, mais les coefficients diffèrent suivant la composition granulométrique des matières.

g. Le volume des vides par unité de volume de mortier frais, considérable pour les mortiers contenant très peu de grains fins (ciment compris), diminue rapidement à mesure que la proportion de ces grains augmente et atteint un minimum d'environ 0,03 quand, la proportion de grains moyens étant nulle, le mélange sec est constitué d'environ parties égales de gros grains et de grains fins.

h. A mesure qu'un mortier vieillit immergé ou à l'air, le ciment qu'il contient s'assimile une proportion croissante d'acide carbonique emprunté au milieu ambiant, en même temps qu'une fraction croissante de l'eau employée pour le gâchage. Pour les mortiers à l'air, les deux tiers environ de l'excès d'eau de gâchage s'évaporent et le dernier tiers reste retenu par capillarité.

j. Si l'on immerge un mortier frais ou sec, le volume d'eau qu'il finit par absorber est, à une très petite constante près, égal au volume total des vides qu'il contenait et qui, par suite, caractérise sa porosité.

k. La perméabilité d'un mortier, c'est-à-dire la propriété qu'il a de se laisser traverser pendant un temps donné par un volume d'eau plus ou moins considérable,

dépend moins du volume total de ses vides que des dimensions qu'ils atteignent individuellement.

Elle est maximum pour les mortiers maigres à gros sables.

l. Le passage continu de l'eau à travers les mortiers en diminue rapidement la perméabilité.

m. La filtration de l'eau de mer à travers les mortiers a souvent pour conséquence leur désagrégation plus ou moins rapide.

n. Toutes choses égales d'ailleurs, au début de la filtration, les mortiers gâchés à bonne consistance plastique sont moins perméables que les mortiers gâchés mou et surtout que les mortiers gâchés avec une faible quantité d'eau.

A la longue, ces écarts s'atténuent et il ne semble pas que, dans le cas de l'eau de mer, la désagrégation soit plus rapide pour les uns que pour les autres.

o. En général les mortiers faits avec un même sable sont d'autant moins perméables qu'ils sont plus riches.

La désagrégation par filtration d'eau de mer est maximum pour les mortiers maigres (environ 200 à 300 kilogrammes de ciment par mètre cube de sable), mais non pour les plus maigres.

p. Pour des mortiers de même richesse, mais de compositions granulométriques différentes, la désagrégation par filtration d'eau de mer se produit d'autant plus rapidement que la proportion de grains fins est plus considérable.

Pour des mortiers simplement immergés, les effets observés peuvent être tout différents.

q. La nature de l'eau de gâchage (eau de mer ou eau douce), exerce sur la résistance des mortiers une influence variable selon la nature des agglomérants.

L'emploi de l'eau de mer ralentit la prise.

r. Si l'on fait varier la proportion d'eau employée pour

le gâchage d'un mortier sans toutefois trop s'écarter des consistances ordinaires de la pratique, on constate qu'en général la résistance diminue à mesure que la proportion d'eau de gâchage augmente.

s. Pour des mortiers de même richesse en ciment, mais de compositions différentes, les résistances peuvent varier entre des limites très écartées. On en conclut que la résistance dépend à la fois de la proportion du ciment et de la compacité du mortier.

t. Quand on essaie à la compression après une même durée de conservation dans des conditions identiques une série de mortiers faits avec un même agglomérant et des sables inertes ou de même nature, on constate que, quelles que soient leurs richesses, les compositions granulométriques des sables et les proportions d'eau employées pour les gâchages, les résistances sont à peu près proportionnelles à la fonction $\frac{c}{e + v}$ ou $\frac{c}{1 - (c + s)}$ des paramètres qui caractérisent la compacité de ces mortiers.

Cette loi permet dans une certaine mesure de comparer d'avance les résistances de mortiers dont on ne connaît encore que les compacités et par suite d'utiliser cette notion à la détermination approximative du meilleur mortier qu'il est possible d'obtenir avec les matériaux dont on dispose.

Expériences synthétiques. — Nous avons relaté au cours des divers chapitres qui précèdent un certain nombre d'expériences exécutées spécialement en vue de mettre en lumière la loi suivant laquelle telle ou telle propriété particulière des mortiers est influencée par telle ou telle de leurs conditions de fabrication. Nous les récapitulerons en montrant comment on peut faire par les mêmes méthodes l'étude complète de quelques séries de mortiers.

Étude d'un sable donné quelconque. — Si le sable à étudier contient des cailloux, on commencera par rechercher l'influence de ces derniers. A cet effet, on déterminera, en opérant avec les mêmes mesures que celles dont on aura à se servir sur le chantier, le poids du mètre cube du sable brut et du même sable débarrassé de ses cailloux. Connaissant la proportion des cailloux, on pourra alors comparer approximativement, comme nous avons fait page 29, les richesses des mortiers obtenus en combinant un même poids de ciment à un même volume de sable brut ou tamisé. On pourra même déterminer expérimentalement la compacité des deux espèces de mortiers, ce qui donnera des renseignements plus exacts.

Lorsqu'on aura pris au sujet de la conservation ou du rejet des cailloux le parti que l'on jugera le meilleur en raison de la nature des travaux à exécuter, des considérations d'ordre économique et des résultats des expériences dont il vient d'être question, il sera utile d'étudier les variations du poids du mètre cube du sable adopté suivant son degré d'humidité.

Puis on déterminera les volumes d'eau les plus convenables pour le gâchage de divers mélanges de ce sable et du ciment à employer et, représentant les proportions trouvées sur un diagramme analogue à celui de la *fig. 16*, on tracera une courbe continue passant le plus près possible des points déterminés par l'expérience.

On confectionnera alors une série de mortiers de dosages variables gâchés avec les proportions d'eau représentées par les points correspondants de la courbe et on déterminera les compacités de ces mortiers.

On obtiendra diverses séries de nombres dont il sera facile de représenter graphiquement les variations par des diagrammes ayant pour abscisses, soit les poids de ciment entrant dans un poids 1 de mélange sec (voir *fig. 17*), soit les poids de ciment combinés à 1 mètre cube

de sable (voir *fig.* 18), soit encore les valeurs de la fonction $\frac{c}{e+v}$ qui mesure approximativement la résistance des mortiers (voir *fig.* 21).

Ces constructions permettront de choisir en bonne connaissance de cause le dosage à adopter, en même temps qu'elles donneront le moyen d'évaluer les diverses qualités du mortier correspondant.

Enfin on recherchera comment la compacité de ce mortier varie avec la proportion d'eau employée à le gâcher, et on mettra en évidence la loi obtenue en traçant une courbe analogue à celles de la *fig.* 4, ou encore, ce qui sera plus pratique, en prenant pour abscisses les volumes d'eau employés pour gâcher la quantité de mortier fournie par un mètre cube de sable et portant en ordonnées les divers poids ou volumes résultant de la détermination des compacités.

Tels sont les principaux essais qu'on devra faire si l'on tient à connaître exactement la composition des mortiers qu'on peut obtenir avec un sable déterminé. Si l'on n'est pas installé de manière à les exécuter avec la précision désirable ou si l'on peut se contenter de notions plus vagues, comme ce sera par exemple le cas quand on voudra faire un choix entre plusieurs sables, on n'aura qu'à déterminer par tamisage la composition granulométrique des sables considérés après en avoir éliminé les cailloux, à marquer dans les triangles les points qui leur correspondent et enfin à se reporter à nos diagrammes. Dans la plupart des cas leurs indications suffiront pour indiquer quel sable on devra choisir et faire connaître approximativement la compacité des mortiers qu'il fournira.

A ce sujet, nous renvoyons à la *fig.* 12 où sont représentés un certain nombre de sables naturels débarrassés de leurs cailloux. On trouvera dans un tableau explicatif

spécial (p. 162) l'indication de leurs provenances et des proportions de sable proprement dit contenues dans chaque sable brut. On remarque que, sauf aux environs des sommets G et F, on ne rencontre pas de sables dont les points représentatifs soient voisins du côté GF, c'est-à-dire de ceux auxquels correspondent les mortiers de compacité maximum.

Étude de deux séries de mortiers respectivement de même dosage. — Nous avons étudié d'une manière spéciale deux séries de mortiers dont les dosages, voisins de ceux qu'on emploie le plus couramment sur les chantiers, étaient évalués comme dans la pratique en poids de ciment par mètre cube de sable.

Les sables employés ont été des mélanges en proportions variables des trois sables étalons G, M, F, obtenus par la mouture de quartzites de Cherbourg. Ayant partagé les côtés du triangle en huit parties égales, nous avons mené par les points de division des parallèles aux autres côtés qui, par leurs intersections, ont donné 45 points, correspondant à 45 sables sur lesquels nous avons opéré.

Nous avons adopté comme poids du mètre cube de chaque sable celui qui résulte de la *fig. 23* et fait avec chaque sable et un même ciment portland deux mortiers à bonne consistance plastique (proportions d'eau déterminées d'avance et régularisées au moyen d'un diagramme) dosés respectivement à raison de 250 et de 500 kilogrammes de ciment par mètre cube de sable.

Nous avons alors déterminé la compacité de tous ces mortiers et confectionné avec chacun d'eux un certain nombre de cubes qui ont été laissés à l'air et pesés de temps en temps, ou immergés dans divers milieux après séchage commun d'une semaine à l'air.

Les diagrammes 43 à 82 représentent les résultats

obtenus. (Figures impaires = mortiers à 250 kilogrammes ; figures paires = mortiers à 500 kilogrammes). Mieux que tout commentaire ils montrent comment les diverses propriétés des mortiers étudiés varient suivant la composition granulométrique des sables. Aussi ne ferons-nous à leur sujet que les quelques remarques suivantes :

Fig. 43 et 44 : Dans un exemple précédemment cité, où il s'agissait de mortiers obtenus en combinant des poids égaux d'un même ciment à des poids égaux de sables de compositions granulométriques différentes, on a vu que la surface topographique représentant la variation de la proportion d'eau nécessaire pour gâcher un même poids de mélange sec n'était autre qu'un plan. Dans le cas actuel où l'on a mélangé des poids égaux de ciment à des volumes égaux, c'est-à-dire à des poids variables de sable, ainsi qu'il résulte de la *fig. 23*, il n'est pas étonnant que la surface topographique obtenue n'ait plus la même forme.

Fig. 51 et 52 : On obtiendrait le volume réel c de ciment contenu dans l'unité de volume de mortier en divisant le poids par 3,10, poids spécifique du ciment employé.

Fig. 53 et 54 : De même on obtiendrait le volume réel s de sable contenu dans l'unité de volume de mortier en divisant le poids par 2,65, poids spécifique du quartzite.

Fig. 51, 52, 55, 56, 59, 60 : Dans ces figures on a tracé en traits plus épais une courbe de niveau correspondant aux sables dont un mètre cube donne avec les poids de ciment considérés précisément un mètre cube de mortier. Pour tous les sables dont les points représentatifs sont situés d'un côté de ces lignes il y a donc eu contraction, c'est-à-dire que le volume de mortier obtenu a été inférieur à celui du sable employé, tandis que tous les autres ont donné lieu à un foisonnement, c'est-à-dire à un volume de mortier supérieur au leur.

Le volume de mortier fourni par 1 mètre cube de sable (*fig.* 59 et 60) est ce qu'on appelle souvent le rendement du sable. Il est évident que pour chaque sable il doit varier suivant la quantité de ciment employée.

On est généralement porté à croire que le mortier le plus compact qu'on puisse obtenir avec un sable donné est celui qui contient une proportion de ciment telle que le rendement soit précisément égal à l'unité, et à admettre que dans ce cas le ciment et l'eau bouchent tous les interstices qui existaient entre les grains du sable pur, de sorte que le mortier ne doit plus contenir de vides. En lisant sur les *fig.* 63 et 64 les cotes qui correspondent aux divers points des courbes cotées 1 des *fig.* 59 et 60, on reconnaîtra qu'il est loin d'en être ainsi, et que le fait que le sable ait dans le mortier gâché le même tassement que quand on l'a mesuré pur, n'implique aucunement que la totalité de ses vides ait été remplie.

Fig. 65 et 66 : Pour tracer ces diagrammes on a adopté comme quantité d'eau perdue celle qui correspond au poids minimum par lequel chaque bloc de mortier soit passé pendant le séchage (voir *fig.* 6), sans tenir compte du gain d'acide carbonique. Ainsi qu'il était facile à prévoir, ce minimum de poids s'est produit après des durées de séchage variables suivant les mortiers et d'autant plus longues qu'ils avaient exigé plus d'eau pour leur gâchage.

Les *fig.* 67 et 68 ont été obtenues en retranchant des sommes $c + s + e$ données par les *fig.* 63 et 64, les volumes perdus représentés par les *fig.* 65 et 66. Elles correspondent donc à peu près au volume plein occupé réellement par les matières contenues dans l'unité de volume de mortier sec. L'excès à 1 de leurs cotes représente le volume total des vides du mortier sec.

Après avoir été conservés à l'air humide pendant une durée de neuf mois, suffisante pour que tous aient pu

atteindre leur minimum de poids, les cubes ayant servi aux essais ci-dessus ont été immergés dans l'eau de mer et pesés de temps en temps. Au bout de trois mois d'immersion tous avaient atteint un poids sensiblement stationnaire.

Les volumes d'eau absorbés par unité de volume de mortier depuis l'immersion sont représentés par les *fig.* 69 et 70 qui indiquent par conséquent la porosité des mortiers secs.

En les ajoutant aux volumes pleins réels entrant dans les mortiers secs (*fig.* 67 et 68), on obtient donc les volumes pleins réels entrant dans les mortiers saturés d'eau, et on constate (*fig.* 71 et 72) que ces volumes sont sensiblement égaux entre eux et très voisins de l'unité. L'eau a donc fini par pénétrer dans tous les pores et les remplir presque complètement.

Seuls quelques mortiers maigres à gros sables font en apparence exception à cette règle à cause des grandes dimensions de leurs vides, dont l'eau qui les remplissait s'échappe dès qu'on sort les blocs de leur bain pour les peser.

Fig. 73 à 80 : Au moment de leur rupture les mortiers exposés un an à l'eau douce ou à l'air humide ne présentaient ni efflorescences ni traces de désagrégation. Quelques mortiers à 500 kilogrammes immergés à l'eau de mer (voisinage immédiat du côté GM) présentaient après la même durée de très légères efflorescences, mais sans montrer non plus aucune trace de désagrégation.

Quant aux mortiers à 250 kilogrammes immergés à l'eau de mer, certains d'entre eux étaient après trois mois parsemés d'efflorescences plus ou moins abondantes, mais aucun ne semblait encore se désagréger. Au bout de six mois presque tous les mortiers du côté GM étaient fissurés, surtout ceux voisins des deux sommets du triangle. Nous avons déjà signalé ce résultat dans un

chapitre précédent en le représentant par une figure schématique (voir page 110).

Six mois plus tard, c'est-à-dire après un an d'immersion, un seul nouveau mortier (milieu de la rangée voisine du côté GM) laissait voir à sa surface de très légères veines, tandis que les fissures des premiers s'étaient pour la plupart ouvertes et approfondies, amenant parfois la démolition complète des cubes. La teinte grise étendue sur une partie des *fig.* 73 à 76 représente par son degré d'intensité l'importance des efflorescences, veines, fissures ou crevasses constatées sur les cubes au moment de la rupture.

D'autres cubes, destinés à être rompus après six années d'immersion, sont à la date du présent mémoire soit après trois ans d'immersion, très sensiblement dans le même état qu'au bout d'un an.

Enfin d'autres cubes identiques comme composition et soumis à la marée seront rompus après la même période de six ans. Nous avons relaté dans le diagramme de la page 110 leur état après six mois, lequel, deux ans et demi plus tard, n'est pas modifié d'une manière bien notable.

Enfin nous donnons dans les *fig.* 81 et 82 les valeurs du rapport $\frac{c}{e+v}$ afin qu'on puisse constater, en les comparant aux huit précédentes, que les variations de ce rapport suivent sensiblement la même loi que celles des résistances.

En terminant le rapide compte rendu de l'expérience synthétique qui vient d'être décrite, nous croyons devoir formuler une observation identique à d'autres déjà maintes fois répétées dans des cas analogues, c'est que nous n'avons pas la prétention de donner comme caractérisant d'une manière absolue tous les mortiers possibles aux dosages de 250 à 500 kilogrammes les résultats

numériques fournis par l'expérience particulière que nous avons exécutée, résultats soumis à diverses influences secondaires dont nous avons dans un chapitre antérieur énuméré les principales.

Par contre, on peut affirmer sans trop de témérité que l'allure générale des lois exprimées par nos diagrammes échappe à ces influences et permet de comparer en toute sécurité les qualités de mortiers à 250 ou à 500 kilogrammes gâchés à même consistance et ne différant entre eux que par la composition granulométrique du sable entrant dans leur composition.

Mais sans aller si loin, il est une conclusion qui ressort d'une manière surabondante de toutes nos expériences, c'est que le choix d'un sable est une opération d'une importance capitale à laquelle on ne saurait procéder à la légère (même en présence d'une apparence d'économie assez considérable), étant donné les énormes écarts constatés entre les propriétés de mortiers de même dosage, écarts bien supérieurs, croyons-nous, à ceux qu'on avait entrevus jusqu'à présent.

Une autre conséquence assez singulière qui se dégage d'un examen sommaire des diagrammes est que, quelles que soient la nature et les proportions des ciments employés, la plupart des qualités des mortiers atteignent leur maximum pour des sables dépourvus de grains moyens.

Est-ce là une particularité toute spéciale au choix des tamis adoptés pour définir les sables G, M, F? Une telle coïncidence serait bien surprenante. Nous allons voir que la loi est générale et indépendante des grosseurs absolues des grains considérés.

Pour cela, nous abandonnerons un instant l'étude des sables qui nous a occupé presque exclusivement jusqu'à présent pour, amplifiant l'échelle, examiner une propriété des pierrailles qui, par leur mélange avec le mor-

tier, donnent les bétons, de même que les sables, avec le ciment, donnent les mortiers.

Tassement des pierrailles. — Les pierrailles naturelles ou artificielles que l'on a à employer sur les chantiers sont des mélanges en diverses proportions de cailloux de différentes grosseurs. Leur tassement doit donc, comme celui des sables, dépendre de leur composition granulométrique.

Nous avons adopté les définitions suivantes :

Cailloux G	{	passant à l'anneau de 6 centimètres de diamètre, retenus par l'anneau de 4 centimètres de diamètre;
Cailloux M	{	passant à l'anneau de 4 centimètres de diamètre, retenus par l'anneau de 2 centimètres de diamètre;
Cailloux F	{	passant à l'anneau de 2 centimètres de diamètre, retenus par l'anneau de 1 centimètre de diamètre.

et déterminé comme pour les sables les poids du mètre cube (en opérant dans une boîte cubique de 0^m,50 de côté) de divers mélanges des trois grosseurs types.

Nous avons opéré parallèlement sur deux pierrailles de natures différentes composées, l'une de galets de silex de forme arrondie, l'autre de pierres cassées à arêtes anguleuses.

Les *fig. 40* et *41*, qui, comme la *fig. 23*, représentent les volumes occupés réellement par la matière dans l'unité de volume apparent, montrent que les variations de tassement, quoique moins étendues que pour les sables, suivent néanmoins la même loi, de telle sorte que le minimum a lieu pour les pierrailles élémentaires G, M, F pures, et le maximum pour certains mélanges des pierrailles G et F, à l'exclusion des pierrailles M.

Le fait observé pour les sables n'est donc pas fortuit, puisqu'il se produit encore avec des matériaux de dimensions très différentes (*).

(*) Remarquons, avant d'abandonner les *fig. 40* et *41*, que les vides restant

Tassement maximum. — Nous venons de reconnaître que, quelles que fussent les définitions adoptées pour caractériser les grosseurs des grains, les mélanges les plus compacts étaient toujours composés de la réunion de deux grosseurs non voisines, et ne contenaient pas de grains intermédiaires.

Nous avons fait plusieurs séries d'expériences en vue de préciser un peu cette loi et plus particulièrement de rechercher comment variaient, suivant les grosseurs des deux groupes de grains, la valeur du tassement maximum et les proportions correspondantes.

Le principe de la méthode a été de combiner deux à deux en diverses proportions des sables calibrés de toutes grosseurs ou même quelques sables mélangés de grosseurs bien nettement différentes, et de déterminer pour chaque couple les deux inconnues en question.

En déterminant les volumes absolus occupés réellement dans une mesure de volume 1, soit par les mélanges sableux secs, soit par les mêmes mélanges gâchés

entre les galets ronds sont bien moindres que ceux des pierres cassées. [Résultat déjà obtenu par M. de Préaudeau, *Annales des Ponts et Chaussées*, 6^e série, II, p. 406 (novembre 1881)]. On devra donc, pour obtenir des bétons également compacts avec un même volume de ces deux matériaux, employer une quantité de mortier plus considérable avec les seconds qu'avec les premiers.

La même remarque explique qu'à dosage volumétrique égal de cailloux et de mortier, les bétons de galets ronds sont bien plus plastiques que ceux de pierres cassées.

On peut confectionner des bétons d'essai avec divers mélanges de mortier et de pierrailles de compositions granulométriques variées, en mesurer ensuite la compacité et diverses propriétés, et faire ainsi une étude générale des bétons parallèle à celle des mortiers qui fait l'objet de ce mémoire. Nous avons exécuté dans ce sens un certain nombre d'expériences dont la description nous entraînerait trop loin et qui trouveront plutôt leur place dans une note spéciale quand nous les aurons suffisamment multipliées en en faisant constamment varier les conditions.

Nous avons rendu compte dans la *Revue du génie militaire* (numéro de juillet-août 1891) de quelques-unes de ces expériences.

préalablement avec les quantités d'eau convenables, et nous aidant de constructions graphiques, nous sommes arrivé à reconnaître les deux lois générales suivantes comme s'appliquant d'une manière suffisamment exacte à tous les mélanges possibles de deux sables tels que les plus petits grains du plus gros soient plus gros que les plus gros grains du plus fin :

1° Quelles que soient les dimensions des deux sables, le mélange qui se tasse le mieux, soit à l'état sec, soit quand on le gâche avec de l'eau, contient à peu près deux parties du plus gros sable pour une du plus fin ;

2° Le tassement maximum est d'autant plus considérable qu'il y a plus d'écart entre les grosseurs des deux sables mélangés (*).

On remarquera que ces deux lois comportent comme cas particuliers celles que nous avons formulées plus haut pour les grains G, M et F' comme conséquences de la *fig.* 34 (voir p. 65).

Nous avons représenté graphiquement, au moyen de la *fig.* 11, les volumes réels de sable entrant dans l'unité de volume apparent de toutes les combinaisons possibles de deux parties d'un sable à grains sensiblement égaux avec une partie d'un autre sable plus fin également régulier, soit que les mélanges fussent mesurés à sec ou après gâchage avec de l'eau.

(*) Il y a lieu de faire une petite restriction, à cette seconde loi :

Si à 2 parties d'un sable donné on mélange 1 partie d'un autre sable dont on augmente progressivement la finesse, le tassement du mélange *mesuré sec* ne va pas en augmentant indéfiniment. Quand le sable le plus fin atteint un certain degré d'extrême finesse (correspondant à peu près au tamis de 900 mailles par centimètre carré), des forces capillaires interviennent en raison desquelles le tassement diminue au lieu d'augmenter à mesure que le sable devient encore plus fin. Mais ce changement d'allure ne se produit pas quand on détermine le tassement des mélanges gâchés avec de l'eau, et ne saurait par suite avoir d'influence sur les considérations relatives à la composition des mortiers.

La matière employée étant du quartzite de Cherbourg moulu, nous avons déterminé le diamètre moyen des grains de chaque sable calibré en pesant un nombre connu de ces grains, déduisant de ce poids le volume moyen d'un grain et appelant diamètre moyen de ce grain le diamètre d'une sphère de même volume.

On obtient sur la figure le tassement d'un mélange quelconque mesuré à sec en lisant la cote du point qui a pour abscisse le diamètre moyen du plus gros sable et pour ordonnée celui du plus fin.

De même le tassement du même mélange mesuré après gâchage est donné par la cote du point ayant pour abscisse le diamètre moyen du sable le plus fin et pour ordonnée celui du plus gros.

Recherche du meilleur mortier possible. — Appliquons maintenant à l'étude spéciale des mortiers les deux lois qui viennent d'être établies.

Nous savons d'abord que la plus grande valeur de $c + s$ correspondra à des mortiers résultant de la réunion de deux catégories de grains de grosseurs très différentes.

Or le mortier devant nécessairement contenir du ciment ou un autre agglomérant quelconque, l'une des grosseurs devra être précisément celle des grains de l'agglomérant. Elle pourra d'ailleurs être composée à la fois de grains d'agglomérant et de grains de sable.

Quant aux autres grains de sable à employer, plus ils seront volumineux, plus le mortier sera compact.

Enfin on devra combiner ces divers grains en proportions telles que le volume absolu des plus gros soit double de celui des plus fins réunis.

Dès lors, aucun sable naturel n'étant constitué par la réunion de gros grains et de grains très fins sans contenir des grains intermédiaires, les règles pratiques à observer sont les suivantes :

Faire choix du plus gros sable possible compatible avec la nature du travail à exécuter. Comme peu de sables naturels contiennent exclusivement des gros grains, il sera avantageux d'éliminer par tamisage les grains les plus petits du sable choisi, de manière à augmenter sa différence de grosseur avec les grains fins.

D'autre part, prendre du sable fin, par exemple du sable de dunes.

Si d , d' et δ représentent les poids spécifiques du gros sable, du sable fin et du ciment, les poids P , p , π de ces trois matières entrant dans 1 mètre cube du mortier de compacité maximum seront liés par la relation :

$$\frac{P}{d} = 2 \left(\frac{p}{d'} + \frac{\pi}{\delta} \right).$$

Le rapport des volumes réels de sable fin et de ciment pourra d'ailleurs être quelconque, sans que la compacité du mortier se trouve pour cela sensiblement modifiée (voir p. 59). En un mot, la somme $c + s$ des volumes absolus de matière solide entrant dans l'unité de volume de mortier ne dépendra que du choix du gros sable.

Soit donc pour le sable choisi α la valeur de cette somme qu'il sera facile de déterminer par une expérience spéciale. On aura entre P , p et π la nouvelle relation :

$$\frac{P}{d} + \frac{p}{d'} + \frac{\pi}{\delta} = \alpha.$$

Enfin il est évident que, la somme $c + s = \alpha$ restant constante, la résistance du mortier augmentera en même temps que la proportion du ciment par rapport à celle du sable fin. On pourra donc se proposer de déterminer cette proportion de manière que la résistance ou encore le rapport $\frac{c}{e + v}$, que nous lui supposons proportionnel, ait une valeur particulière. Si par exemple on a reconnu

que, pour un ciment donné et une certaine nature d'ouvrages, on peut se contenter d'une valeur de $\frac{c}{e+v}$ égale à b , on devra avoir :

$$b = \frac{c}{e+v} = \frac{c}{1-(c+s)} = \frac{c}{1-a},$$

et par suite :

$$\frac{\pi}{\delta} = c = b(1-a),$$

et enfin, en tenant compte des deux équations précédentes :

$$\frac{P}{d} = \frac{2}{3} a, \quad \frac{p}{d'} = \frac{a}{3} - b(1-a).$$

On connaîtra donc les poids des éléments à combiner pour obtenir le meilleur mortier possible (*).

Il est à noter qu'avec les mortiers répondant à cette formule, c'est-à-dire dans lesquels le volume absolu du ciment n'excède jamais la moitié de celui du sable, on pourra obtenir des résistances tout aussi élevées qu'avec des mortiers beaucoup plus riches en ciment et même presque aussi élevées qu'avec le ciment pur.

Si l'on adopte par exemple la plus forte valeur que nous ayons trouvée pour $c+s$, soit 0,75, et qu'on ne mélange pas de sable fin au ciment, on déduira des formules précédentes en y faisant $a=0,75$ et $p=0$:

$$b = \frac{c}{e+v} = 1,00,$$

ce qui est une très forte valeur pour ce rapport.

Avec le ciment pur, le volume réel de matière solide

(*) Connaissant le poids du mètre cube des deux sables employés, il sera facile de transformer les poids trouvés en volumes apparents, si l'on juge plus commode dans la pratique de mesurer le sable au volume.

par unité de volume de pâte fraîche est d'environ 0,53 (voir *fig.* 17), ce qui donne $\frac{c}{e + v} = \frac{0,53}{1 - 0,53} = 1,13$, valeur de bien peu supérieure à la précédente.

Enfin il convient de remarquer encore que, dans ce qui précède, nous avons implicitement supposé que tous les grains du gros sable employé étaient sensiblement de même grosseur. Il est probable que la composition granulométrique de ce sable exerce encore une certaine influence sur la valeur du maximum de $c + s$. Toutefois cette influence doit être de second ordre, et il n'y a guère à craindre qu'elle modifie les lois générales que nous avons formulées.

Nous comptons faire quelques nouvelles expériences en vue d'éclaircir ce point.

Conclusions. — De déductions en déductions, nous venons d'être amené à énoncer dans le paragraphe qui précède une formule générale reposant de près ou de loin sur la plupart des expériences relatées dans ce mémoire, et qu'on peut considérer comme les condensant toutes en elle seule.

Cette formule constitue-t-elle la solution de la question des mortiers et doit-on se tenir pour satisfait maintenant qu'on la possède?

Évidemment non, car alors même qu'elle serait établie sur des bases bien plus solides que celles que nous avons pu lui donner, il resterait difficile d'admettre qu'une seule formule puisse indiquer dans tous les cas possibles la meilleure composition à adopter pour les mortiers.

Il ressort, en effet, de l'ensemble de notre travail qu'on peut demander aux mortiers bien des qualités diverses qui ne s'y rencontrent jamais toutes simultanément à leur maximum de développement, de sorte que la

meilleure composition doit varier avec la nature des ouvrages à exécuter.

Enfin, la composition à adopter dépend aussi presque toujours de considérations d'ordre financier qu'il est nécessaire de faire entrer en ligne à côté des données techniques, mais dont l'influence varie suivant l'importance des ouvrages.

D'ailleurs, notre formule suppose qu'on sait dans chaque cas de quelle valeur on peut se contenter pour

le rapport $\frac{c}{e + v}$ qui caractérise la dureté du mortier.

Cette valeur dépendra, non seulement des conditions du travail à exécuter, mais aussi de la nature et de l'énergie de l'agglomérant employé. Nous avons vu, en effet, que la résistance au bout d'un temps donné était mesurée

par le produit du rapport $\frac{c}{e + v}$ par un facteur K va-

riable suivant la nature de l'agglomérant et les conditions de conservation du mortier. On devra donc, pour pouvoir compter sur une même résistance, faire entrer dans les divers mortiers des proportions de ciment telles

que les rapports $\frac{c}{e + v}$ correspondants soient inverse-

ment proportionnels aux valeurs que prend K pour chaque agglomérant dans les conditions d'exposition et après la durée où les mortiers seront appelés à subir les efforts auxquels ils auront mission de résister.

Nous avons entrepris depuis peu une étude générale des variations du coefficient K , soit quand des mortiers où entre un même ciment restent exposés dans des conditions identiques pendant des durées de plus en plus prolongées, soit quand on considère après une même durée des mortiers où entrent des ciments de provenances et de natures différentes.

Quant aux conditions dans lesquelles les mortiers sont

appelés à travailler, il serait impossible de les prévoir toutes de manière à les étudier à l'avance. C'est à chaque ingénieur qu'il appartient de les déterminer dans les divers cas particuliers qui l'intéressent, pour pouvoir ensuite calculer la compacité à adopter, par comparaison avec celle de mortiers connus et déjà éprouvés par un long usage dans des circonstances peu différentes.

Boulogne, le 17 septembre 1891.

TABLEAU DES SABLES (FIG. 12).

Détail des provenances.

NUMÉRO DU SABLE	POIDS de sable proprement dit contenu dans le sable brut	PROVENANCE	NUMÉRO DU SABLE	POIDS de sable proprement dit contenu dans le sable brut	PROVENANCE	
	p. 100			p. 100		
1	99,7	Meuse, en aval de Rotterdam.	38	98,7	Baie de Kerné }	
2	100	Dunkerque (sable de dunes).	39	99,5	Beg-er-Lan. }	
3	100	Calais (sable de dunes).	40	96,0	Grève de Port-Maria. }	
4	91,5	Wimereux et la Crèche, près Boulogne.	41	98,5	Baie de Port-Navalo.	
5	92,8		42	99,6	Port Yorck }	
B	»		43	91,7		Belle-Ile-en-Mer.
P	»		44	93,6		
D	100		45	94,8		
6	84,2	Boulogne (sable de dunes).	46	96,7		
7	86,7	Equihen, près Boulogne.	47	99,7	Port Blanc d'Azic . . }	
8	99,4	Dieppe (plage).	48	99,7	Nantes (dragages de la Loire).	
9	93,8	Le Havre (sous-sol).	49	98,6	Les Sables-d'Olonne.	
10	100	Le Havre (plage).	50	99,0		
11	98,6	Environs de Rouen (diverses carrières).	51	100	Environs de La Rochelle.	
12	98,7		52	94,0		
13	99,7	Deauville. } Calvados.	53	97,8	Ile d'Oléron.	
14	99,5		54	99,8		
15	99,1	Courseulles. }	55	99,9	Bordeaux (banc de Queyries, dans la Garonne).	
16	73,5	56	99,8			
17	94,1	Gattemarre. }	57	100	Oporto (Portugal).	
18	90,6		58	99,7		
19	72,3		Sainte-Anne } près Cherbourg.	59	100	Maubeuge (diverses carrières).
20	63,8	60		100		
21	99,0	61		100		
22	74,6	Urville }	62	100	Sable de l'Oise (environs de La Fère).	
23	93,4	Cosqueville. }	63	99,7		
24	99,0	Saint-Malo.	64	93,3	Sable de Moselle (Longwy).	
25	96,9		65	71,7	Toul.	
26	95,2	Sable de la Rance (île Chevret).	66	97,4	Gennevilliers.	
27	96,4		67	61,6	Triel.	
28	98,7	Dinard.	68	90,5	Juvisy.	
29	99,1	La Roche-Jagu (rivière de Trieux).	69	71,5	Fontainebleau.	
30	98,7		70	100	Sable du Drac }	
31	97,5	Portrieux. } Côtes du Nord.	71	99,8	Sable de la Durance. }	
32	97,5		72	99,7	Mélanges artificiels en diverses proportions de sables de Gattemarre et de Cosqueville.	
33	96,7		Trouzoul }	C	»	Mélange artificiel de sables de Belle-Ile-en-Mer.
34	100	Portz-Terne. }	Q	»		
35	99,7	Quimper.	A	»		
36	82,0					
37	100					
	82,8					

TABLE DES MATIÈRES.

I. — EXPOSÉ.

	Pages.
État de la question. — Principe de la méthode suivie.	5

II. — COMPOSITION GRANULOMÉTRIQUE DES SABLES.

Séparation des cailloux. — Sables calibrés. — Méthode des mélanges. — Représentation graphique de la composition granulométrique des sables. — Représentation des résultats d'expériences. — Division du sujet. . .	11
---	----

III. — MESURAGE DU SABLE ET DU CIMENT.

Méthode généralement employée. — Influence de l'humidité. — Sables contenant des cailloux. — Composition granulométrique du sable. — Capacité des jauges et manière de les remplir. — Forme des grains. — Conclusion. — Mesurage du ciment au volume. — Mélange du sable et du ciment.	23
--	----

IV. — PROPORTION D'EAU A EMPLOYER POUR LE GÂCHAGE.

Variabilité de la proportion d'eau de gâchage. — Consistance normale du ciment pur. — Consistance normale des mortiers sableux. — Influence de la richesse des mortiers. — Influence de la composition granulo- métrique du sable. — Variation simultanée de la richesse des mortiers et de la composition granulométrique des sables. — Variations de con- sistance. — Règle adoptée pour les essais	35
--	----

V. — COMPACITÉ DES MORTIERS FRAIS.

Mesure de la compacité des mortiers frais. — Influence de la richesse des mortiers. — Influence de la composition granulométrique du sable. — Généralisation. — Variation de la compacité des mortiers suivant leur composition granulométrique. — 1 ^{er} Problème. — 2 ^e Problème. — Étude d'une fonction quelconque des volumes c, s, e, v . — Variation de la compacité des mortiers frais suivant la proportion d'eau employée pour le gâchage. — Gâchage et mise en œuvre des mortiers. — Autres influences	52
---	----

VI. — VARIATION DE LA COMPACITÉ AVEC LE TEMPS.

	Pages.
Variation du poids des mortiers. — Variation des volumes <i>c, s, e, v.</i> — Loi de M. Alexandre. — Eau retenue par le ciment pur après séchage. — Eau retenue par les mortiers après séchage. — Porosité des mor- tiers secs. — Mortiers immergés.	77

VII. — FILTRATION DE L'EAU A TRAVERS LES MORTIERS.

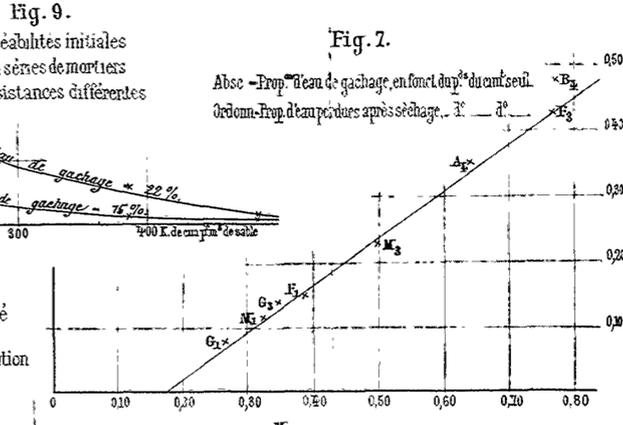
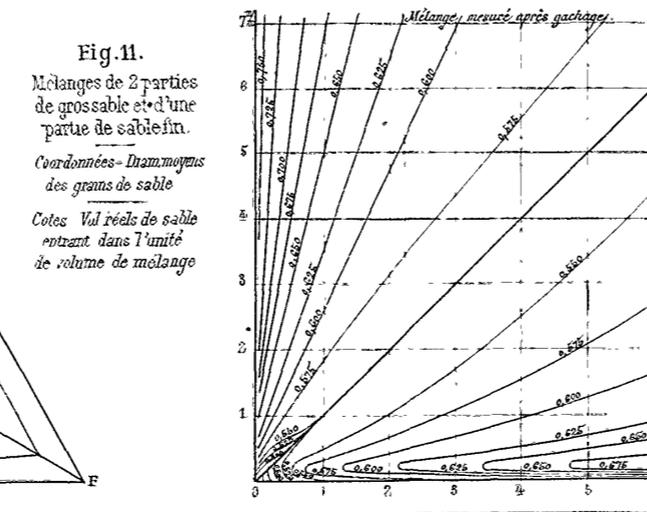
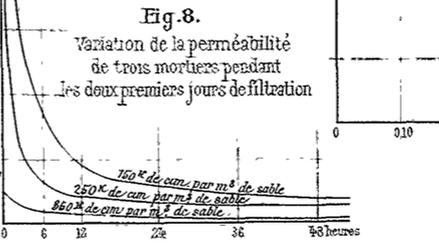
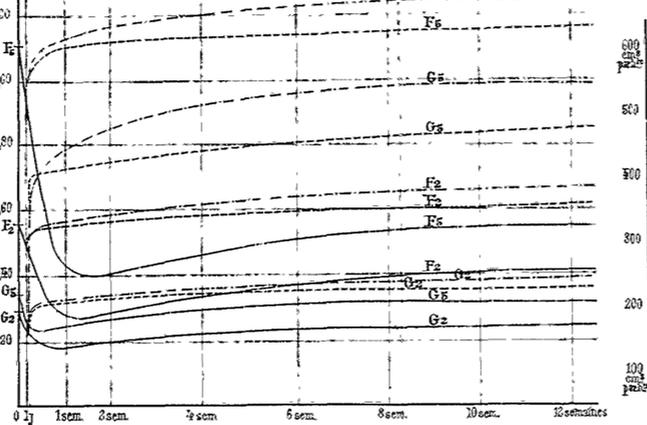
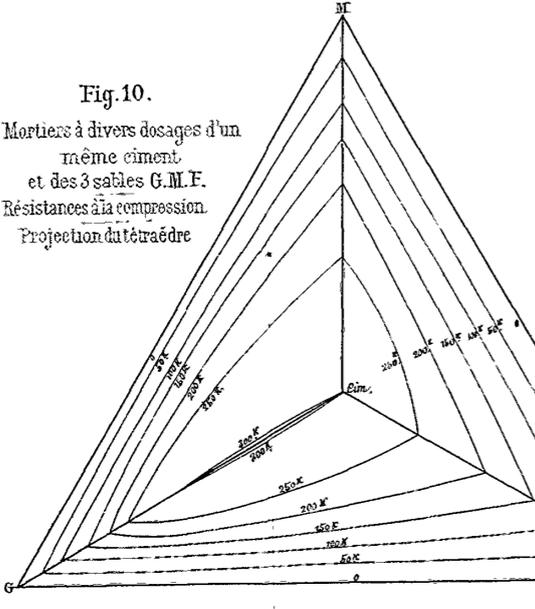
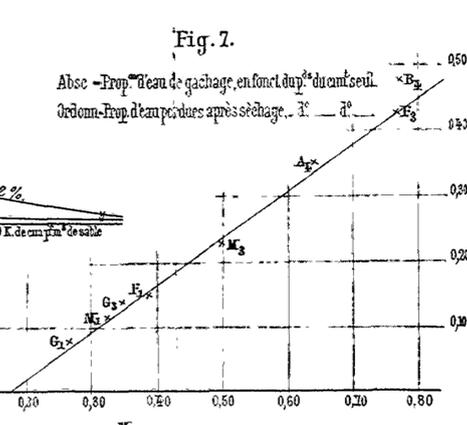
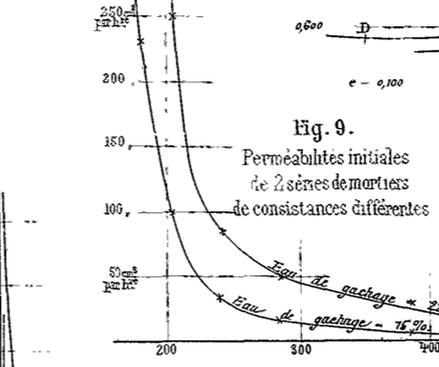
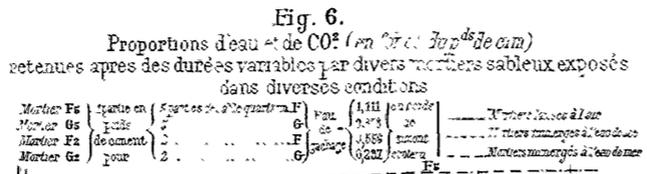
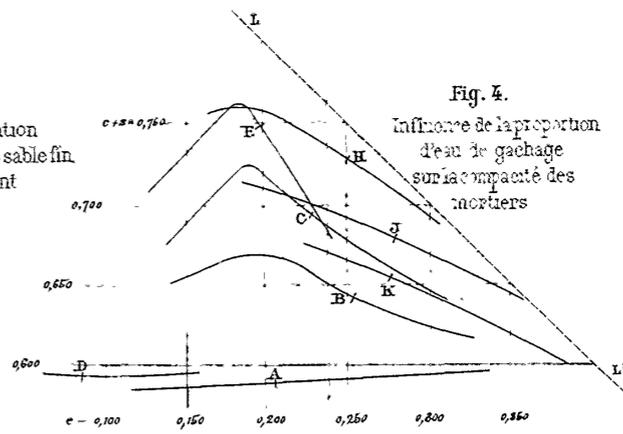
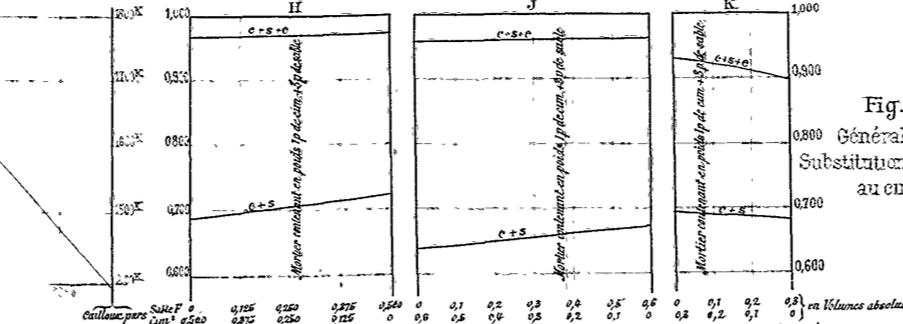
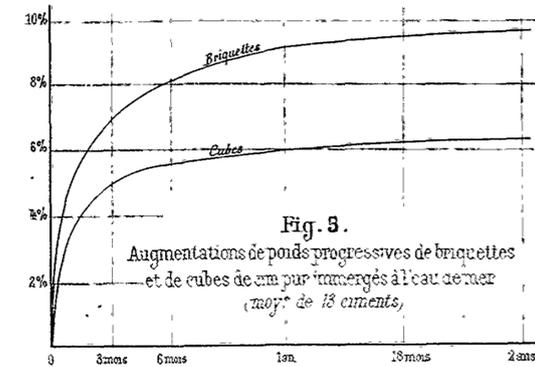
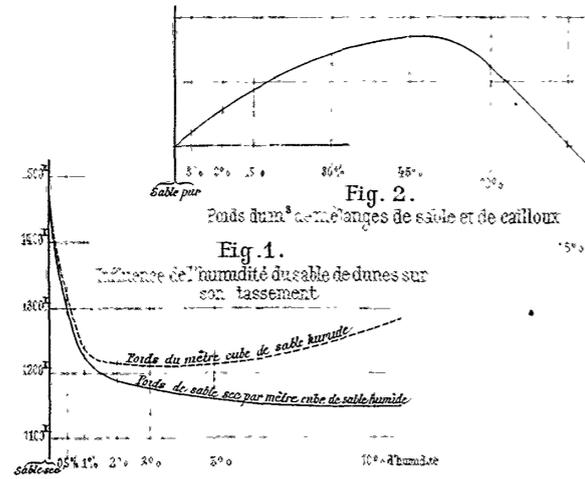
Perméabilité des mortiers. — Effets produits par le passage de l'eau. — Procédés d'expérience. — Variation de la perméabilité d'un même mor- tier. — Influence de la nature du liquide filtrant. — Influence de l'eau de gâchage. — Influence de la nature de l'agglomérant. — Influence de la richesse des mortiers. — Influence de la composition du sable. — Décomposition par simple immersion. — Processus mécanique de la désagrégation. — Conclusion.	91
--	----

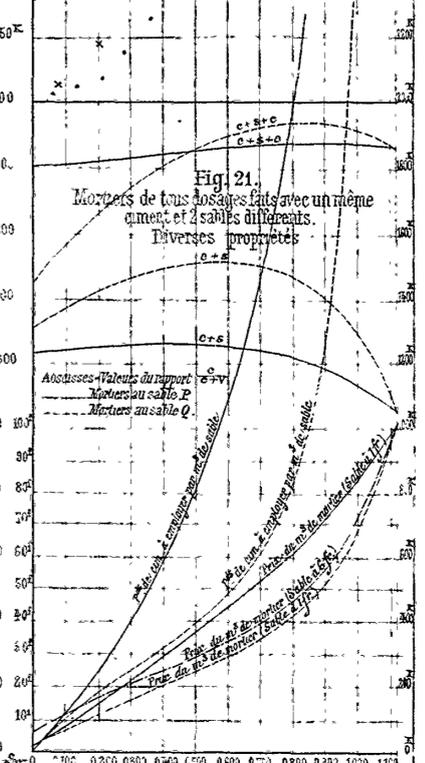
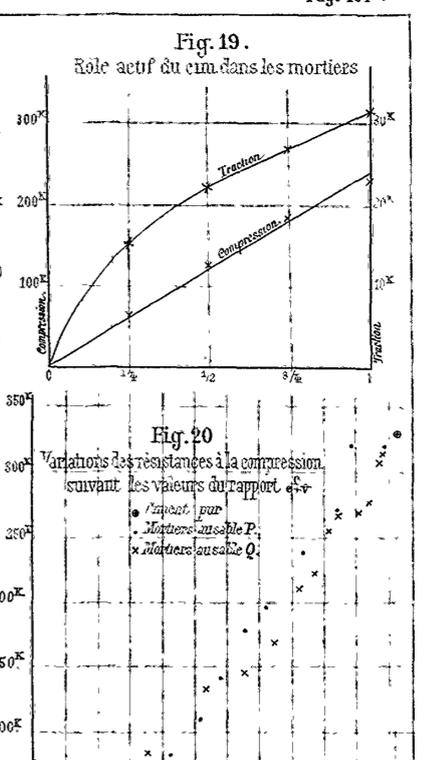
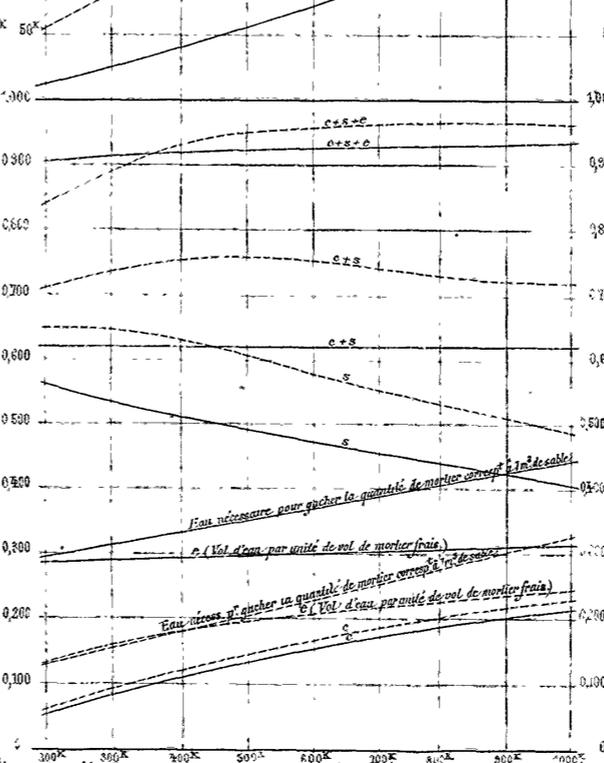
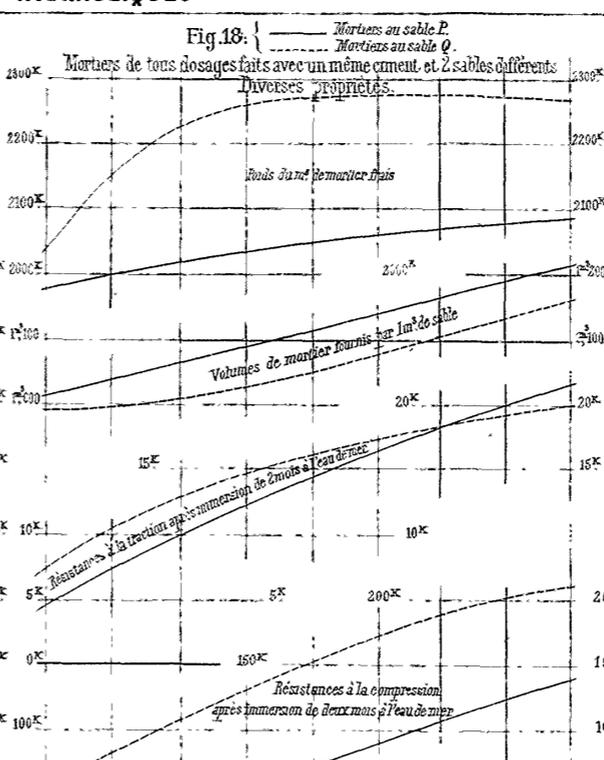
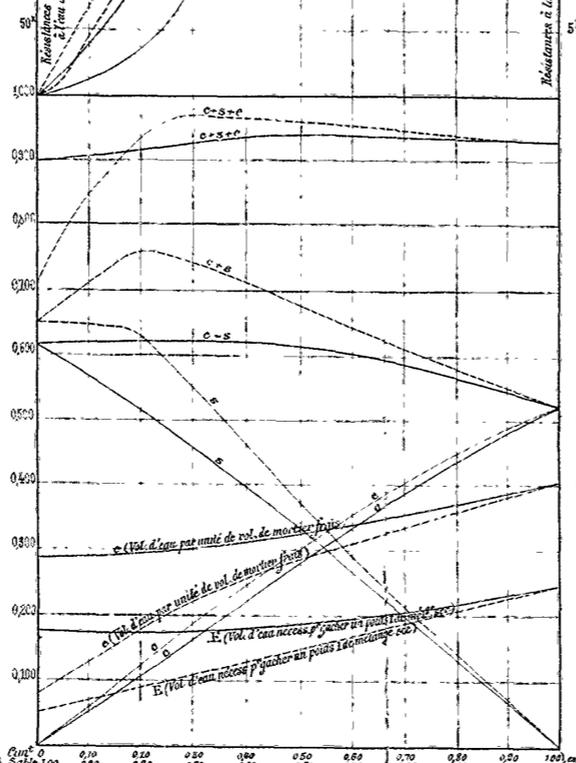
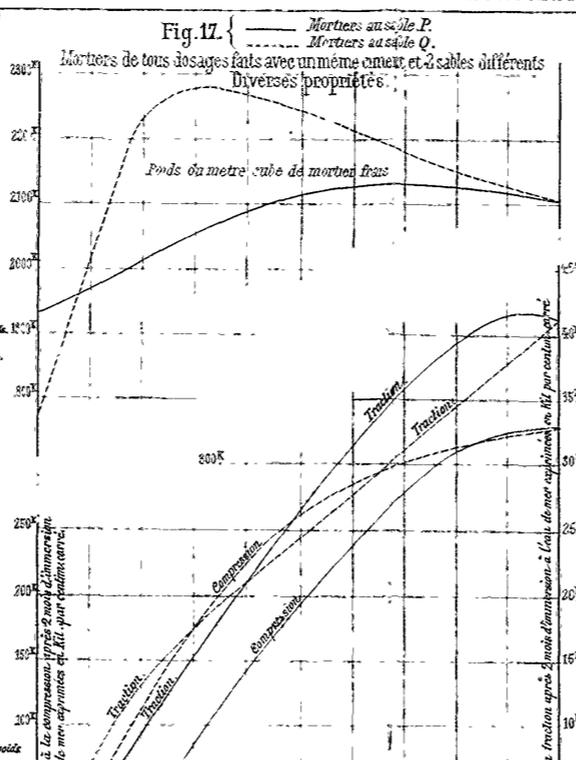
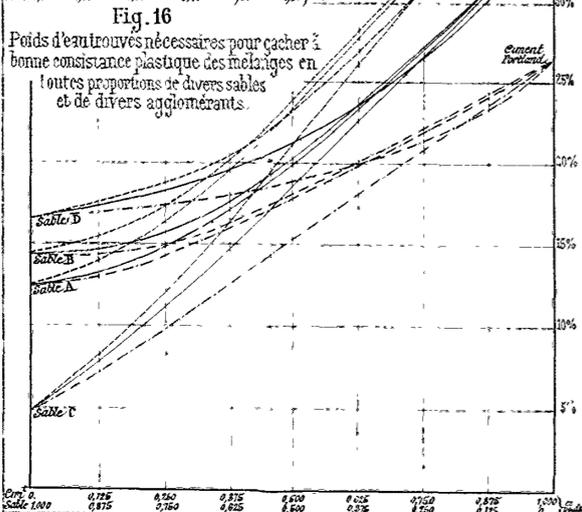
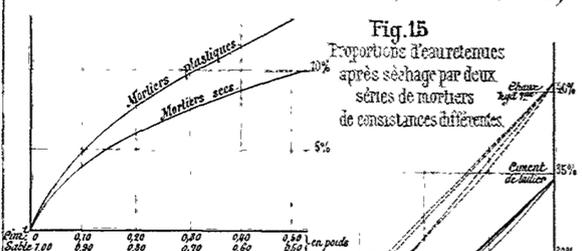
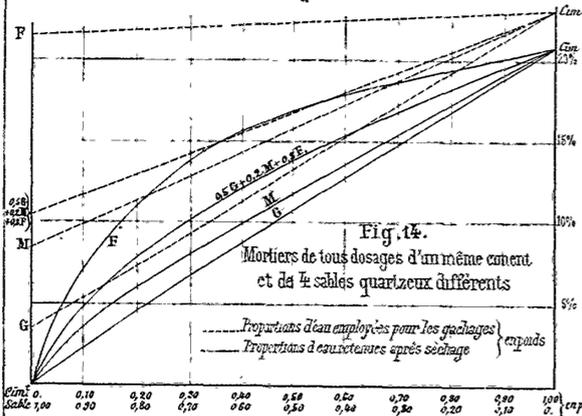
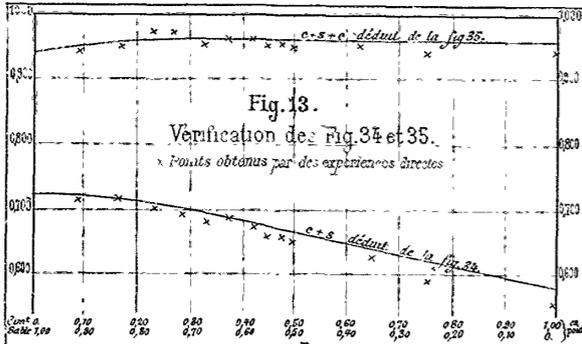
VIII. — RÉSISTANCES.

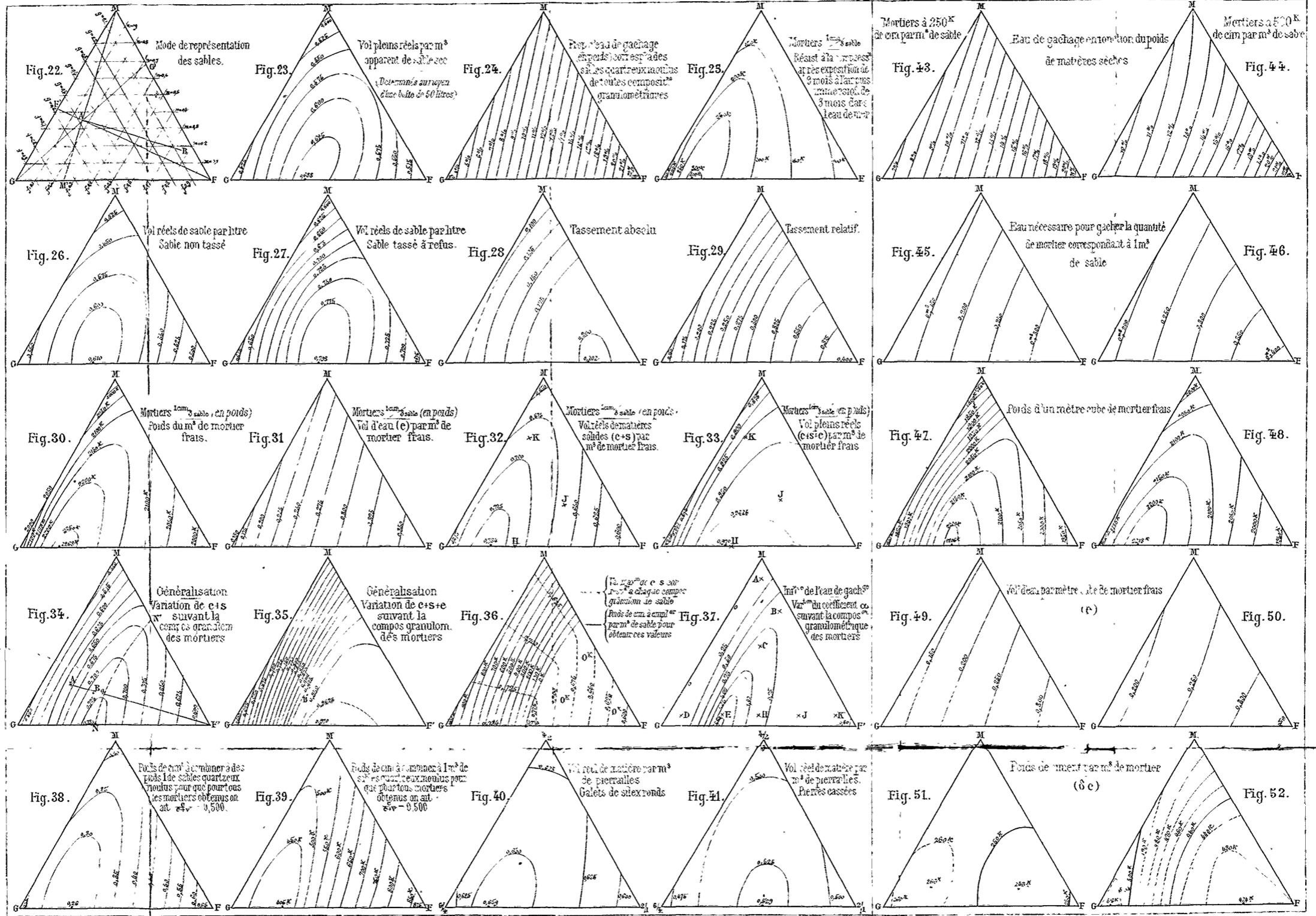
Utilité des essais de résistance. — Durée de prise. — Variabilité des résistances. — Nature de l'eau de gâchage. — Proportion de l'eau de gâchage. — Nature du sable. — Composition granulométrique du sable. — Richesse du mortier. — Relation entre la compacité et les résis- tances. — Mortiers faits avec un même ciment et un même sable. — Choix d'un sable. — Comparaison de sables de diverses compositions granulométriques. — Comparaison de sables ou de ciments.	117
---	-----

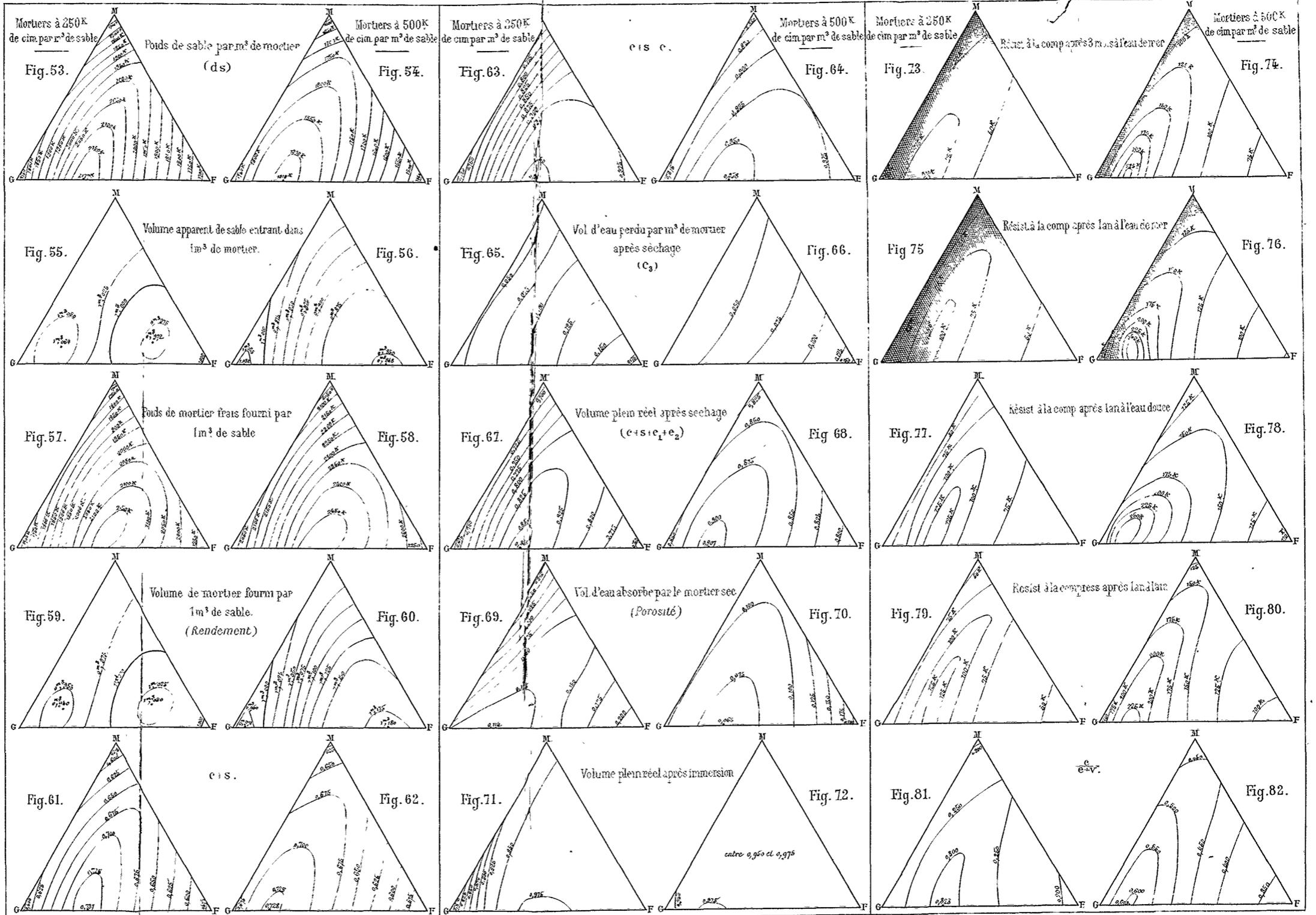
IX. — VUES D'ENSEMBLE ET CONCLUSIONS.

Résumé. — Expériences synthétiques. — Étude d'un sable donné quel- conque. — Étude de deux séries de mortiers respectivement de même dosage. — Tassement des pierrailles. — Tassement maximum. — Re- cherche du meilleur mortier possible. — Conclusion.	140
TABLEAU DES SABLES (Explication de la <i>fig. 12</i>).	162









[Annales des ponts et
chaussées. Mémoires et
documents relatifs à l'art des
constructions et au service
de l'ingénieur]

. [Annales des ponts et chaussées. Mémoires et documents relatifs à l'art des constructions et au service de l'ingénieur]. 1892.

1/ Les contenus accessibles sur le site Gallica sont pour la plupart des reproductions numériques d'oeuvres tombées dans le domaine public provenant des collections de la BnF. Leur réutilisation s'inscrit dans le cadre de la loi n°78-753 du 17 juillet 1978 :

- La réutilisation non commerciale de ces contenus ou dans le cadre d'une publication académique ou scientifique est libre et gratuite dans le respect de la législation en vigueur et notamment du maintien de la mention de source des contenus telle que précisée ci-après : « Source gallica.bnf.fr / Bibliothèque nationale de France » ou « Source gallica.bnf.fr / BnF ».

- La réutilisation commerciale de ces contenus est payante et fait l'objet d'une licence. Est entendue par réutilisation commerciale la revente de contenus sous forme de produits élaborés ou de fourniture de service ou toute autre réutilisation des contenus générant directement des revenus : publication vendue (à l'exception des ouvrages académiques ou scientifiques), une exposition, une production audiovisuelle, un service ou un produit payant, un support à vocation promotionnelle etc.

[CLIQUER ICI POUR ACCÉDER AUX TARIFS ET À LA LICENCE](#)

2/ Les contenus de Gallica sont la propriété de la BnF au sens de l'article L.2112-1 du code général de la propriété des personnes publiques.

3/ Quelques contenus sont soumis à un régime de réutilisation particulier. Il s'agit :

- des reproductions de documents protégés par un droit d'auteur appartenant à un tiers. Ces documents ne peuvent être réutilisés, sauf dans le cadre de la copie privée, sans l'autorisation préalable du titulaire des droits.

- des reproductions de documents conservés dans les bibliothèques ou autres institutions partenaires. Ceux-ci sont signalés par la mention Source gallica.BnF.fr / Bibliothèque municipale de ... (ou autre partenaire). L'utilisateur est invité à s'informer auprès de ces bibliothèques de leurs conditions de réutilisation.

4/ Gallica constitue une base de données, dont la BnF est le producteur, protégée au sens des articles L341-1 et suivants du code de la propriété intellectuelle.

5/ Les présentes conditions d'utilisation des contenus de Gallica sont régies par la loi française. En cas de réutilisation prévue dans un autre pays, il appartient à chaque utilisateur de vérifier la conformité de son projet avec le droit de ce pays.

6/ L'utilisateur s'engage à respecter les présentes conditions d'utilisation ainsi que la législation en vigueur, notamment en matière de propriété intellectuelle. En cas de non respect de ces dispositions, il est notamment passible d'une amende prévue par la loi du 17 juillet 1978.

7/ Pour obtenir un document de Gallica en haute définition, contacter utilisation.commerciale@bnf.fr.