

# LE CIMENT PORTLAND

fabriqué au moyen des  
LAI TIERS DE HAUT-FOURNEAU

PAR

HENRI DETIENNE

Ingénieur honoraire des Mines

[6691 : 6915]

(Suite.)

---

## CHAPITRE III.

### L'addition de laitier granulé aux roches cuites avant la mouture.

Depuis longtemps on a constaté que le ciment provenant de roches cuites seules, donne généralement sous le rapport de la résistance, surtout aux épreuves de traction, des résultats moindres que lorsqu'on ajoute à ces mêmes roches, au moment de la mouture, 10 à 20 % de laitier granulé.

Les causes de ce phénomène sont multiples.

On peut d'abord concevoir qu'une certaine addition de laitier granulé, matière pouzzolanique, améliorera le ciment portland qui, par suite d'une erreur de dosage, renfermerait un excès de chaux non combinée.

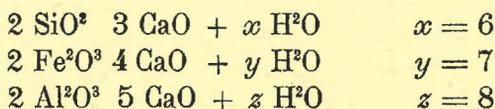
Cette chaux libre réagira au moment du gâchage, avec une partie du laitier pour former au sein de la masse de ciment portland une certaine quantité de ciment de laitier, dont la résistance, au moins à l'état de mortier normal, atteint et surpasse même facilement celle du ciment portland.

Par conséquent, on n'a pas à craindre ici de dépasser, ne fût-ce que de 1/2 %, la teneur de calcaire compatible avec la composition du laitier ou de l'argile. Les roches de ciment portland de laitier peuvent être à forte teneur en CaO. Celles de Wetzlar ont 66 à 67 % de chaux ; leur module d'hydraulicité (rapport entre la quantité de chaux et celles de silice, d'alumine et d'oxyde de fer) s'élève à 2.30.

Or, la chaux est l'élément actif du durcissement d'un ciment, les résistances de ce dernier croissent donc avec sa teneur en chaux. Malheureusement si cette dernière est un tant soit peu exagérée, la stabilité du ciment est compromise, aussi longtemps que l'excès de chaux ne trouve pas une matière qui s'en empare ; par exemple, une pouzolane suffisamment énergique telle que le trass, le laitier granulé, etc.

Il se présente encore une autre circonstance pour laquelle une addition de laitier granulé est hautement à conseiller, c'est lorsque le ciment est destiné à des travaux à la mer.

Le Dr Wilhelm Michaëlis, dans une importante étude publiée en 1895, sur la *Résistance des matériaux hydrauliques à l'eau de mer*, fait remarquer que les combinaisons chimiques qui se forment pendant le durcissement du ciment portland (il s'agissait alors de matières argilo-calcaires) sont :



et que si l'on considère deux ciments portland, l'un *a* caractérisé par une faible teneur en chaux et l'autre *b* par une forte teneur en chaux, tels que :

	<i>a</i>	<i>b</i>
Silice. . . . .	22.50	20.778
Alumine. . . . .	8.99	5.819
Oxyde de fer . . . .	4.00	2.720
Acide sulfurique . . .	1.00	0.520
Chaux . . . . .	61.04	68.379
Magnésie . . . . .	2.47	1.784
Alcalis . . . . .		

il restera après le gâchage, en supposant que les trois composés indiqués ci-dessus aient pris naissance (et ce sont les plus riches en chaux), 13.79 parties de chaux non saturée dans *a* et 29.1 parties de chaux non saturée dans *b*, sans compter de part et d'autre la magnésie et les alcalis.

Or, dit-il « un produit renfermant une proportion aussi » considérable de chaux libre, élément doué d'une affinité » chimique puissante, ne peut pas être considéré au point » de vue chimique comme une combinaison stable ».

L'inconvénient n'est pas grave lorsqu'il s'agit de mortiers exposés à l'air ou dans des eaux chargées d'acide carbonique; mais il n'en est pas de même dans l'eau de mer. Là, les sulfates dissous dans l'eau ne tarderont pas à attaquer d'abord la chaux libre, puis la chaux combinée d'une façon instable avec l'oxyde de fer, puis celle qui est sous forme d'aluminate et de silicate. Il se produira donc du sulfate de chaux cristallisant avec deux molécules d'eau. Celui-ci, par l'augmentation de volume qui en résultera, ébranlera la structure du mortier déjà plus ou moins durci. D'autre part, le sulfate de chaux réagit en outre avec l'aluminate de chaux pour constituer ensemble un sel double, le sulfo-aluminate de chaux, cristallisant avec 28.5 à 30 molécules d'eau et provoquant lui, un énorme accroissement de volume qui disloque les mortiers les plus solides avec une puissance irrésistible.

Ainsi, dans un ciment portland contenant 64 % de CaO,

7.1 d'alumine et 0.8 % d'acide sulfurique, il restera après gâchage 25 parties de chaux vive correspondant à 33 parties d'hydrate. Celles-ci se combinant au sulfate de magnésie donneront 74.5 parties de gypse. Il y a donc de ce chef formation d'une masse additionnelle pesant :

$$74.5 - 33 = 41.5$$

Les 7.1 parties d'alumine formeront 26.64 parties d'hydro-aluminate de chaux suivant la formule donnée plus haut. Cet aluminate réagissant avec le gypse donnera en admettant la cristallisation avec 30 molécules d'eau, 85 parties en poids de sulfo-aluminate.

Il se forme donc une addition de :

$$74.5 + 85 - (33 + 26.64 + 36 \text{ de gypse entré dans le sel double}) = 63.86 \text{ parties}$$

en poids de matière au sein d'une masse pesant au début 125; soit donc une augmentation de poids de 50 %.

Dans de telles conditions la masse primitive doit inévitablement éclater, à moins que des circonstances ne viennent entraver l'action du sulfate de magnésie.

L'un des ces moyens préventifs est la carbonatation de la chaux non combinée, obtenue par exemple en n'immergeant les blocs de béton en eau de mer qu'après qu'ils ont séjourné plus ou moins longtemps au contact de l'air. Le carbonate de chaux n'est pas décomposé à la température ordinaire par le sulfate de magnésie. Mais cette carbonatation ne s'exerce qu'à la périphérie du bloc sur une épaisseur relativement faible, aussi si l'eau de mer parvient à s'infiltrer au delà de la couche de mortier carbonaté, les réactions qui provoquent l'expansion du massif reprendront leur cours et la désagrégation s'ensuivra.

Parfois, les incrustations d'origine animale et végétale qui tapissent les parois du béton empêchant l'infiltration des eaux salines constituent une protection efficace.

Mais ce sont en somme des moyens détournés d'un emploi généralement impossible.

Or, si l'on considère que tous les ciments portlands, même les plus pauvres en chaux, en renferment en excès (13 à 14 % au minimum), on doit en conclure qu'ils sont tous sujets à se détériorer à l'eau de mer et cela avec d'autant plus d'énergie qu'ils sont plus riches en chaux et en alumine.

Le véritable moyen de parer au danger signalé, c'est de fixer la chaux libre ou celle qui est mise en liberté au cours du durcissement, en lui présentant une matière pouzzolanique avec laquelle elle se combinera. Ce moyen avait déjà été indiqué par le D<sup>r</sup> Michaelis, dès 1882, au grand mécontentement du *Deutsche portland Cement Fabrikanten Verein*, qui protesta contre l'addition de matières étrangères au ciment. Les essais qui ont été continués par la suite paraissent bien confirmer la théorie de M. Michaelis, et l'addition au ciment portland de matières pouzzolaniques et notamment de trass est recommandée par plusieurs autorités scientifiques. Les pouzzolanes les plus riches en silice et les plus pauvres en alumine hydraulique sont les mieux appropriées pour cet usage.

Or, le laitier granulé est une pouzzolane très énergique, plus même que le trass, car ce dernier combiné à la chaux ne donne guère les résistances que l'on obtient par le ciment de laitier. De plus, il convient encore mieux que le trass, au point de vue économique, parce qu'il est moins coûteux et aussi parce qu'on doit par suite de sa forte teneur en CaO en employer une plus grande quantité ; et ce fait qui pourrait paraître désavantageux quant à la qualité du ciment obtenu, ne l'est plus dès que l'on sait que le ciment de laitier est incomparablement plus résistant que le ciment de trass.

L'étude du D<sup>r</sup> Michaëlis a reçu une confirmation nou-

velle, il y a deux ans, à la suite des recherches très sérieuses entreprises, en France, par M. H. Lechâtelier sur la décomposition des ciments à la mer.

Nous avons déjà dit que c'est surtout la formation du sulfo-aluminate de chaux qui provoque la désagrégation des mortiers.

Les ciments alumineux sont donc à craindre. M. Lechâtelier l'a constaté en préparant, au laboratoire, des ciments à teneurs diverses en alumine. Or, ceux qui contenaient 15 % d'alumine se sont détruits avec une extrême rapidité dans les dissolutions de  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{MgSO}_4$  et dans l'eau de mer. A la teneur de 4,5 % d'alumine, la décomposition est encore complète, mais plus lente. Dans certains ciments, M. Lechâtelier a remplacé l'alumine par les sesquioxydes de fer et de chrome. Ces ciments se sont comportés d'une façon remarquable dans les mêmes dissolutions.

L'alumine est donc bien la cause prédominante de la décomposition des ciments à l'eau de mer. « Le danger de » la présence de l'alumine est atténué par la réduction de » la teneur en chaux, mais sous ce rapport on est limité » par l'abaissement corrélatif des résistances mécaniques », écrit M. Lechâtelier, et il ajoute : « Le danger de l'alumine » semble pouvoir être complètement annihilé par l'addi- » tion des pouzzolanes siliceuses; il est atténué par toutes » les pouzzolanes et en particulier par les cendres des com- » bustibles. . . . . »

Or, les ciments portland de laitier renferment en général 7 à 8 % d'alumine, et les ciments portland d'argile et de craie 5 à 10 %. Ils ont donc tous besoin de cette addition de pouzzolane, soit trass, soit laitier granulé. L'une et l'autre de ces deux matières renferment elles-mêmes, il est vrai, de l'alumine et en même proportion, mais probablement à un état inactif, car le ciment de laitier résiste particulièrement bien à l'eau de mer, malgré une teneur en

alumine qui dépasse généralement 10 %; de même le ciment de trass se comporte aussi très bien à la mer.

De tout ce qui précède il résulte clairement, croyons-nous, que l'addition de laitier granulé aux roches cuites se justifie soit pour parer aux inconvénients dus à une erreur de dosage, soit pour augmenter la sécurité lors de l'emploi du ciment à la mer.

Or, personne mieux que le fabricant ne peut faire cette ajoute; il dispose de moyens d'assurer le dosage, le mélange et le broyage des deux matières que l'on ne peut rencontrer sur aucun chantier de travail.

En Allemagne, un conflit s'est élevé à propos de l'addition du laitier granulé aux roches cuites de ciment portland de laitier, entre les fabricants de ce dernier et le *Verein* des fabricants de portland d'argile. Ceux-ci interdisent aux premiers l'emploi des mots *ciment portland* pour la désignation d'un produit additionné de matières étrangères après cuisson. Ils se sont en outre adressés au Gouvernement pour réclamer l'exclusion, de tous les travaux publics, d'un ciment additionné de laitier granulé.

Les fabricants de ciment portland de laitier ont maintenu leur prétention de pouvoir ajouter du laitier granulé à leurs roches cuites et ils ont constitué le *Verein Deutscher Eisen Portland Cement Werke* (Association des Usines allemandes à ciment portland de fer) et sous le puissant patronnage de l'Association des Métallurgistes allemands ils défendent leur industrie auprès des Ministres compétents.

Ils offrent d'augmenter les résistances prescrites par les *normen* prussiennes, de limiter l'ajoute de laitier granulé à 30 %, de faire contrôler constamment, par un laboratoire et à leurs frais, le ciment fabriqué couramment par chacune

des usines de leur groupe. Ils demandent la nomination d'une Commission officielle chargée d'étudier leur mode de fabrication, de visiter leurs usines et de faire exécuter suivant un plan élaboré d'avance des essais sur les produits d'un certain nombre d'usines à ciment portland d'argile, et du même nombre d'usines à portland de laitier.

Cette demande a été accueillie et la Commission a commencé ses travaux.

D'autre part, l'Association des fabricants de ciment portland de fer (portland de laitier) contrôle, depuis le commencement de juillet dernier, la qualité des produits vendus par ses affiliés; à cet effet, chaque usine doit désigner à la fin de chaque mois, les noms de six clients chez l'un desquels le laboratoire agréé fait prélever l'échantillon nécessaire pour les essais du mois suivant. Il s'agit donc bien de cette façon de produits marchands, et non de ciments spécialement préparés. Les essais sont faits par le laboratoire du Dr Passow, de Hambourg. Voici les résultats des essais de juillet, août, septembre et octobre 1902 :

Essais des ciments portland de fer de l'Association des Usines allemandes de portland de fer

JUILLET 1902

PROVENANCE DU CIMENT ESSAYÉ	POIDS du litre		FINESSE de mouture		DURÉE de prise		POIDS spé- cifique	ESSAIS D'INVARIABILITÉ de volume ÉPREUVES			TRACTION mortier 1 : 3 28 jours		COMPRESSION 1 : 3 28 jours	
	Non tassé	Tassé	900	4900	Début	Fin		Nor- males	Air chaud	Va- peur	Sous l'eau	A l'air	Sous l'eau	A l'air
	Eisenwerk Kraft (Stet- tin) . . . . .	1076	1624	0.4 o/o	6.5 o/o	3.25		5.35	3.042	invar.	invar.	invar.	18.25	21.9
Budérus (Wetzlar) . . .	1085	1602	0.4 o/o	6.5 o/o	1.55	5.10	3.002	»	»	»	25.1	24.1	210	250
Niederrheinische Hütte (Rhurort) . . . . .	1010	1538	0.5 o/o	6 o/o	1.65	4.0	3.002	»	»	»	19.25	29.9	228.6	241.3
Usine à ciment portland de Ruhrort . . . . .	1098	1565	4.5 o/o	15 o/o	1.10	2.0	3.003	»	»	»	18.25	19.6	122	147.6
Usine à ciment portland de Rombach . . . . .	1088	1705	0 o/o	5 o/o	1.35	4.50	3.065	»	»	»	22.75	24.8	210	223.3
Usine à ciment portland de Urbach . . . . .	1118	1580	0.5 o/o	8.5 o/o	1.00	2.55	2.932	»	»	»	21.75	24.8	175.3	186.0
Usine à ciment portland de Wetzlar . . . . .	1050	1516	2 o/o	11 o/o	1.25	3.35	2.956	»	»	»	26.4	29.75	208	219

## Essais des ciments portland de fer de l'Association des Usines allemandes de portland de fer

AOUT 1902

PROVENANCE DU CIMENT	POIDS du litre		FINESSE de mouture		DURÉE de prise		POIDS spé- cifique	ESSAIS D'INVARIABILITÉ de volume ÉPREUVES			TRACTION 1 : 3 28 jours		COMPRESSION 1 : 3 28 jours	
	Non Tassé	Tassé	900	4900	Début	Fin		Nor- males	Air chaud	Va- peur	Sous l'eau	A l'air	Sous l'eau	A l'air
Eisenwerk Kraft (Stet- tin) . . . . .	1094	1622	0.2 0/0	5.5 0/0	5.20	7.55	3.003	invar.	invar.	invar.	25 0	31.0	268	294
Budérus (Wetzlar) . .	1100	1577	1 0/0	8 0/0	4.5	7.30	3.015	»	»	»	24.75	33.3	230	274.6
Niederrheinische Hutte (Ruhrt) . . . . .	1055	1622	0.4 0/0	2.5 0/0	5.40	10.15	2.991	»	»	»	25.75	32.6	247.3	258
Usine à ciment portland de Rührort. . . . .	1065	1470	4 0/0	11.8 0/0	2.55	4.20	2.952	»	»	»	20.5	19.75	140	183
Usine à ciment portland de Rombach . . . . .	1056	1521	0.5 0/0	6.2 0/0	5.20	7.35	3.006	»	»	»	20.75	27.6	256	268.6
Usine à ciment portland à Urbach . . . . .	1110	1571	2.5 0/0	12.6 0/0	1.50	5.10	2.900	»	»	»	20.8	24.5	205.3	212
Usine à ciment portland de Wetzlar . . . . .	1065	1486	2 0/0	10.5 0/0	2.25	5.30	2.924	»	»	»	25.4	29.0	201	284

LE CIMENT PORTLAND DE LAITER

415

Essais du ciment portland de fer de l'Association des Usines allemandes de ciment portland de fer

SEPTEMBRE 1902

PROVENANCE DU CIMENT	POIDS du litre		FINESSE de mouture		DURÉE de prise		Poids spé- cifique	TRACTION après 28 jours Mortier 1:3		COMPRESSION 1 : 3 après 28 jours	
	Non tassé	Tassé	900 m.	5000 m.	Début	Fin		Sous l'eau	A l'air	Sous l'eau	A l'air
	Usines Kraft à Kratzwick (Stettin).	1150	1600	0.8 o/o	10.2 o/o	0.20		0.40	3.043	17.6	22.5
Usines Budérus . . . . .	1086	1560	1.1 o/o	9 o/o	5.5	7.35	3.033	22.3	23.6	234	240
Niederrheinische Hutte . . . . .	1075	1580	1 o/o	8 o/o	2.50	5.45	2.976	14.6	21.2	186	198.6
Usine de Ruhrort . . . . .	<b>N'a pas fabriqué pendant ce mois</b>										
Usine de Rombach . . . . .	1086	1585	1 o/o	9.5 o/o	1.45	5.20	2.974	24.3	24.0	262	252
Usine de Urbach . . . . .	<b>On n'a pu obtenir des échantillons chez les clients.</b>										
Usine de Wetzlar . . . . .	1000	1477	0.8 o/o	10 o/o	2.35	4.50	2.927	25.3	28.2	254	231

Essais du ciment portland de fer de l'Association des Usines allemandes de ciment portland de fer

OCTOBRE 1902

PROVENANCE DU CIMENT	POIDS du litre		FINESSE de mouture		DURÉE de prise		POIDS spé- cifique	TRACTION après 28 jours Mortier 1:3		COMPRESSION 1 : 3 après 28 jours	
	Non tassé	Tassé	900 m.	5000 m.	Début	Fin		Sous l'eau	A l'air	Sous l'eau	A l'air
Usines Kraft à Kratzwick (Stettin). . . . .	1098	1464	0.40/o	6/o	—	0.10	2,994	20.0	25.6	285	280
Usines Budérus . . . . .	1115	1617	0.70/o	8.50/o	4.30	5.45	3,030	22.7	34.8	215	263
Niederrheinische Hütte . . . . .	1009	1448	0.250/o	2.50/o	1.5	5.0	2,953	19.3	29.0	299	354
Usine Ruhrort . . . . .	<b>N'a pas fabriqué pendant ce mois.</b>										
Usine de Rombach . . . . .	1154	1545	0.550/o	9 o/o	1.20	4.50	3.049	17.6	27.0	297	307.6
Usine de Urbach. . . . .	1160	1681	4.50/o	19 o/o	2.20	4.35	2.905	20,8	30.7	192	198.7
Usine de Wetzlar . . . . .	<b>Le Docteur Passow n'a pu se procurer dans le commerce du ciment de cette usine.</b>										

LE CIMENT PORTLAND DE LAITIER

Analyses chimiques de cinq échantillons de ciment non mélangé, c'est-à-dire sans addition de laitier, de l'Association des Usines allemandes de ciment portland de fer.

PROVENANCE	PERTES au feu	SiO <sup>2</sup>	Al <sup>2</sup> O <sup>3</sup> + Fe <sup>2</sup> O <sup>3</sup>	CaO	MgO	SO <sup>3</sup>	TOTAL
Budérus	pas dosé	20.52	10.04	64.48	1.92	2.08	99.04
Urbach . . .	2.87	18.68	13.20	58.42	2.52	2.35	98.04
Ruhrort. . .	2.74	20.04	10.04	61.43	1.92	2.42	99.59
Wetzlar. . .	2.50	23.38	10.00	62.47	0.10	1.25	99.47
Kratzwick . .	2.64	18.94	10.86	62.44	2.42	2.17	99.47

Ou après élimination de la perte au feu :

PROVENANCE	SiO <sup>2</sup>	Al <sup>2</sup> O <sup>3</sup> + Fe <sup>2</sup> O <sup>3</sup>	CaO	MgO	SO <sup>3</sup>	TOTAL
Budérus . . . . .	20.52	10.04	64.48	1.92	2.08	99.04
Urbach . . . . .	19.24	13.60	60.17	2.60	2.42	98.03
Ruhrort . . . . .	20.51	10.32	63.18	1.97	2.48	98.46
Wetzlar . . . . .	23.98	10.25	64.17	0.10	1.28	99.78
Kratzwick . . . . .	19.45	11.15	64.13	2.48	2.22	99.43

Analyses chimiques de deux échantillons de ciment de l'Association des fabricants allemands de ciment portland.

PROVENANCE	PERTES au feu	SiO <sup>2</sup>	Al <sup>2</sup> O <sup>3</sup> + Fe <sup>2</sup> O <sup>3</sup>	CaO	MgO	SO <sup>3</sup>	TOTAL
Heidelberg. .	6.50	22.90	11.14	55.36	2.81	1.39	100.10
X . . . . .	6.02	16.20	10.40	64.28	1.80	1.80	99.97

## Ou après élimination de la perte au feu :

PROVENANCE	SiO <sup>2</sup>	Al <sup>2</sup> O <sup>3</sup> + Fe <sup>2</sup> O <sup>3</sup>	CaO	MgO	SO <sup>3</sup>	TOTAL
Heidelberg . . . . .	24.47	11.91	59.20	3.00	1.48	100.06
X . . . . .	17.23	11.06	68.39	1.35	1.91	99.94

Ce dernier ciment X est comme on le voit pauvre en silice et très riche en CaO. Les essais d'invariabilité de volume effectués sur ce ciment ont donné de très mauvais résultats faisant soupçonner de prime abord un dosage défectueux.

Quant à la question de savoir quelle est la proportion de laitier granulé que l'on peut ajouter aux roches cuites, elle n'est pas encore bien élucidée et il est fort probable qu'elle ne peut se résoudre d'une façon générale. Le D<sup>r</sup> Passow, de Hambourg, a entrepris une série d'essais pour apprécier l'effet de l'ajoute de laitier à certains ciments.

Il a opéré : 1° sur du ciment portland de laitier provenant des usines Budérus, de Wetzlar; 2° sur du ciment portland de Heidelberg, provenant de la fabrication ordinaire au moyen de matières argileuses et 3° sur le ciment portland X, cité plus haut et provenant également du même mode de fabrication.

Voici les résultats que ces essais directs ont donné :

I. — Ciment portland de laitier de la firme Budérus  
de Wetzlar.

NATURE DES ÉPREUVES		Ciment provenant ex- clusivement de roches cuites.	Roches cuites additionnées de 30 % de laitier gra- nulé.	Roches cuites additionnées de 50 % de laitier granulé.		
Poids du litre.	Non tassé. . .	1.171	—	—		
	Tassé . . .	1.677	—	—		
Finesse	900 mailles	1 %	—	—		
	5,000 »	14 %	—	—		
Prise	Début . . .	3 heures	—	—		
	Fin . . .	5 h. 50'	—	—		
Invariabilité de volume	eau froide . .	Invariable	—	—		
	Vapeur à 100°	»	—	—		
	Eau bouillante	"	—	—		
RÉSISTANCE DU MORTIER 1 : 3	Traction.	Kilog.	Kilog.	Kilog.		
		A l'air	3 jours. . .	21.7	—	—
			7 » . . .	25.6	23.1	20.1
		Dans l'eau.	28 » . . .	25.8	29.75	29.1
			6 mois. . .	—	—	—
			3 jours. . .	16.1	—	—
	7 » . . .		19.4	22.5	19.5	
	Compression	A l'air.	28 » . . .	21.7	31.3	25.8
			6 mois. . .	—	—	—
		Dans l'eau.	7 jours. . .	212	188	160
			28 » . . .	252	188	163
			7 jours. . .	155	160	116
28 » . . .			224	172	188	

On ne peut guère tirer de conclusions bien établies d'une seule série d'essais de ce genre, d'autant plus que des résultats obtenus ci-dessus on ne peut déduire avec certitude la preuve, constatée souvent par nous même cependant, que l'addition d'une certaine quantité de granulé, aux roches cuites, améliore sensiblement la résistance du ciment qui en dérive.

Dans le cas présent on constate :

1° Que la résistance à la compression du mortier normal, tant dans l'eau que dans l'air, est diminuée;

2° Que la résistance à la traction des éprouvettes conservées dans l'eau s'améliore dès les premiers jours; et dans l'air au contraire, il n'en est de même qu'au bout d'un certain temps seulement.

## II. — Ciment portland I (argile) de Heidelberg.

NATURE DES ÉPREUVES		CIMENT I pur	CIMENT I plus 10 o/o granulé	CIMENT I plus 20 o/o granulé	CIMENT I plus 30 o/o granulé	CIMENT I plus 50 o/o granulé		
Poids du litre.	Non tassé . . .	1,200	1,160	1,149	1,145	1,140		
	Tassé. . . . .	1,470	1,536	1,523	1,510	1,456		
Finesse	900 mailles . .	1 o/o	1 o/o	1 o/o	1/2 o/o	1/2 o/o		
	5,000 » . . . .	8 o/o	10 o/o	12 o/o	9 o/o	9 o/o		
Prise	Début . . . . .	6 heures	4 h. 30'	4 heures	4 heures	4 h. 50'		
	Fin . . . . .	8 »	5 h. 20'	5 h. 20'	5 h. 30'	6 heures		
Poids spécifique . . . . .		3,093	3,09	3,08	3,04	3,00		
		Kilog.	Kilog.	Kilog.	Kilog.	Kilog.		
MORTIER 1 : 3. — RÉSISTANCE	Traction	A l'air	3 jours . . . . .	17.9	18.1	14.0	15.8	12.0
			7 » . . . . .	23.6	26.9	23.3	22.4	22.8
			28 » . . . . .	29.3	31.6	33.0	34.5	34.5
		Sous l'eau	6 mois . . . . .	35.2	35.7	42.8	46.6	43.2
			3 jours . . . . .	16.6	16.5	13.6	11.8	8.2
			7 » . . . . .	18.9	20.8	17.9	13.8	11.5
	Compression	A l'air	28 » . . . . .	22.0	23.2	25.9	22.5	27.6
			6 mois . . . . .	29.3	34.2	35.8	35.0	34.0
			7 jours . . . . .	196.0	181.0	169.0	178.0	114.0
		Sous l'eau	28 » . . . . .	234.0	244.0	174.0	173.0	215.0
			6 mois . . . . .	336.0	266.0	278.0	238.0	342.0
			7 jours . . . . .	200.0	136.0	144.0	172.0	82.6
Invariabilité de volume.		28 » . . . . .	234.0	182.0	159.0	179.0	210.0	
		6 mois . . . . .	340.0	336.0	298.0	276.0	322.0	
		} Toutes les galettes se sont bien conservées dans l'eau froide, l'eau bouillante et la vapeur d'eau à 100°C.						

De cette série d'essais effectués sur le ciment portland provenant non plus de laitier granulé, mais de matières argileuses, on peut conclure que l'addition de laitier granulé aux roches cuites :

1° Diminue la résistance du mortier à la compression, quoique cette diminution devienne de moins en moins sensible à mesure que le mortier conservé tant à l'air, que dans l'eau vieillit. Après 6 mois de conservation, le mortier provenant de ciment additionné de 50 % de granulé donne sensiblement la même résistance à la compression que le même mortier provenant de ciment pur ;

2° Augmente la résistance à la traction du mortier conservé à l'air ou dans l'eau et que jusqu'à un certain point cette augmentation est d'autant plus considérable que le mortier est plus vieux et provient d'un ciment à plus forte ajoute de granulé.

### III. — Ciment portland II (argile) de Heidelberg.

Les mêmes essais ont été répétés par le D<sup>r</sup> H. Passow, sur un second échantillon de ciment provenant de la même usine.

Nous les transcrivons ci-après. Ils montrent également qu'au point de vue de la résistance à la compression, l'addition de granulé aux roches cuites de ciment portland est déprimante surtout dans les premiers temps qui suivent le gâchage des mortiers. Quant à la traction, elle devient meilleure après un certain laps de temps pour les ciments additionnés de laitier granulé.

NATURE DES ÉPREUVES		Ciment Heidelberg II	Heidelberg II plus 30 0/0 granulé	Heidelberg II plus 50 0/0 granulé		
Poids du litre	Non tassé . . .	1.170	1.160	1.150		
	Tassé. . . . .	1.525	1.520	1.500		
Finesse	900 mailles . .	1 0/0	1 0/0	1/2 0/0		
	5,000 » . . .	9 0/0	10 0/0	9 0/0		
Prise . . . . .	Début . . . . .	6 heures	4 heures	5 heures		
	Fin . . . . .	8 »	5 h. 30'	6 h. 30'		
Poids spécifique . . . . .		3.18	3.07	3.06		
		Kilog.	Kilog.	Kilog.		
MORTIER 1 : 3. — RÉSISTANCE	Traction	A l'air	3 jours . . . . .	13.8	18.0	21.0
			7 » . . . . .	21.3	25.6	22.1
			28 » . . . . .	26.5	34.8	38.1
		Sous l'eau	6 mois . . . . .	34.5	42.4	39.2
			3 jours . . . . .	14.2	12.8	14.9
			7 » . . . . .	20.7	20.0	16.5
	Compression	A l'air	28 » . . . . .	23.4	27.0	24.4
			6 mois . . . . .	29.8	36.9	35.8
			7 jours . . . . .	211.0	187.0	114.0
		Sous l'eau	28 » . . . . .	265.0	220.0	269.0
			6 mois . . . . .	314.0	292.0	344.0
			7 jours . . . . .	204.0	156.0	123.0
		28 » . . . . .	255.0	232.0	174.0	
		6 mois . . . . .	344.0	310.0	320.0	
Invariabilité de volume . . . . .		Toutes les épreuves donnent de bons résultats.				

IV. — Enfin une nouvelle série d'essais sur un troisième

échantillon de ciment de Heidelberg, donne des résultats un peu différents comme on va le voir ci-après :

NATURE DES ÉPREUVES		Ciment Heidelberg III	Heidelberg III plus 30 o/o granulé	Heidelberg III plus 50 o/o granulé		
Poids du litre	Non tassé . . .	1.105	1.150	1.130		
	Tassé. . . . .	1.420	1.510	1.490		
Finesse	900 mailles . . .	2 o/o	1 o/o	1/2 o/o		
	5,000 » . . . . .	10 o/o	9 1/2 o/o	10 o/o		
Prise . . . . .	Début . . . . .	18 minutes	30 minutes	40 minutes		
	Fin . . . . .	35 »	40 »	1 h. 5'		
Poids spécifique . . . . .		3.00	3.05	3.02		
		Kilog.	Kilog.	Kilog.		
MORTIER 1 : 3. — Résistance	Traction	A l'air	3 jours . . . . .	16.0	14.6	11.8
			7 » . . . . .	16.9	23.3	18.0
			28 » . . . . .	22.1	24.4	26.8
		Sous l'eau	6 mois . . . . .	28.1	38.0	39.2
			3 jours . . . . .	14.0	13.5	9.7
			7 » . . . . .	14.4	18.6	13.5
	Compression	A l'air	28 » . . . . .	16.4	21.7	21.6
			6 mois . . . . .	25.8	30.2	29.6
			7 jours . . . . .	109.0	146.0	131.0
		Sous l'eau	28 » . . . . .	182.0	191.0	192.0
			6 mois . . . . .	256.0	386.0	292.0
			7 jours . . . . .	101.0	128.0	117.0
Invariabilité de volume . . . . .	} Toutes les épreuves donnent de bons résultats.					

Comme on le constate, la résistance à la compression est *augmentée* par l'addition de 30 % de granulé, contrairement à ce qui s'était produit dans les essais précédents. Quant à la résistance à la traction elle suit la même loi que précédemment.

De tous ces essais effectués au moyen d'eau douce et sur des ciments sainement fabriqués, il résulte déjà ce fait que l'addition d'une certaine quantité de laitier granulé aux roches cuites peut dans certains cas se justifier au point de vue technique.

Mais c'est surtout au moyen d'eau de mer que de tels essais devraient être poursuivis et en se servant de produits mal fabriqués, tels que le ciment portland d'argile X dont nous avons donné ci-dessus une analyse chimique.

Ce ciment X a été soumis à des épreuves après addition de certaines quantités de granulé. Les résultats sont consignés ci-après. On remarquera l'influence bienfaisante et prévue d'ailleurs du granulé, en ce qui concerne l'invariabilité de volume du ciment gâché et soumis à l'action de l'eau froide et de l'eau bouillante.

Le résultat de l'essai à la vapeur d'eau à 100° C. reste défectueux; mais il n'en est pas moins vrai qu'il y a une amélioration sensible due à l'addition de laitier granulé aux roches cuites du ciment X.

Quant à la résistance, elle est aussi généralement améliorée tant à la traction qu'à la compression, étant donné la qualité plutôt médiocre de ce ciment mal dosé.



De tous ces essais l'on conclut donc bien à une amélioration de la résistance à la traction du ciment due à l'addition de laitier granulé.

En ce qui concerne la compression, les résultats sont contradictoires. Comme nous l'avons déjà signalé ci-dessus, c'est surtout par des essais effectués en eau de mer que ces expériences auraient été concluantes, puisque c'est là que les effets de la chaux libre sont à craindre.

En tous cas, les tableaux des pages 414, 415, 416 et 417 montrent que les ciments portland fabriqués en Allemagne, au moyen des laitiers, sont absolument assimilables aux meilleurs ciments portland d'argile. Ils ont tous reçu au moment du broyage une addition de 20 à 30 % de laitier granulé.

Quant aux essais comparatifs que la Commission gouvernementale a prescrits sur les produits de quatre usines à portland de laitier et quatre à portland d'argile, ils ne sont pas encore assez avancés pour en parler actuellement; mais nous ne pensons pas qu'on puisse élever le moindre doute sur l'admission définitive, dans les travaux publics, du ciment portland de laitier avec ajout de granulé, au même titre que l'ancien portland.

#### CHAPITRE IV.

### **Les cahiers des charges et les essais de ciment.**

Les administrations publiques consacrent chacune dans le cahier des charges qui est appliqué pour les travaux qui la concerne, un chapitre spécial au mode de réception des ciments. Les conditions à remplir par ces derniers sont plus ou moins nombreuses et à leur simple lecture, on ressent déjà cette impression que l'appréciation des qualités d'un échantillon de ciment doit être une chose bien épineuse.

En effet, on ne se borne pas à exiger que le produit fini réponde à toutes les nécessités pour lesquelles on l'emploie, on veut encore s'immiscer dans la fabrication, et le luxe de précautions que l'on prend ainsi aboutit à imposer de nombreuses conditions de réception, dont certaines sont inutiles et d'autres absolument contradictoires.

Ainsi, tout le monde sait parfaitement que plus le ciment est fin, plus la résistance d'un mortier déterminé de sable et de ciment sera élevée. Cela ne signifie pas cependant que tout ciment finement moulu sera résistant, car s'il est vrai que la finesse influe sur la résistance, il n'est pas exact de croire que la résistance n'est influencée que par la finesse de mouture. Un ciment mal cuit est certainement de qualité inférieure et cependant il est plus facile à moudre qu'un ciment bien scorifié. Celui-ci, même insuffisamment broyé, sera toujours supérieur à l'autre. Dans ces conditions, on peut se demander pourquoi il faut imposer une certaine finesse de mouture en même temps qu'une résistance minimum. Que le consommateur stipule la résistance qu'il exige du ciment, rien de plus juste; mais qu'il laisse alors aux fabricants le moyen de la réaliser comme ils l'entendent, chacun pour le cas particulier dans lequel il se trouve. C'est là un exemple de superfétation dans les clauses à observer.

Comme exemples de stipulations contradictoires, nous citerons les deux suivants :

Certains cahiers des charges, après avoir prescrit la finesse de la mouture, stipulent qu'un hectolitre de ciment devra peser au moins 130 kilog. dans certaines conditions de tassement. Or, plus un ciment est fin plus le volume des vides existant entre ses grains est grand et plus le volume réel ainsi que le poids de ce ciment diminuent. Un fabricant peut donc se trouver dans l'obligation de broyer très finement son ciment pour répondre aux conditions de

résistance et celles-ci remplies, il constatera que le poids de ce ciment est assez réduit pour ne plus répondre à la demande du cahier des charges. Cette stipulation, encore appliquée aujourd'hui, est un souvenir de l'époque où la proportion de roches dures contenues dans le ciment était relativement faible par suite de l'impossibilité ou tout au moins de la difficulté rencontrée dans le broyage de ces roches. Aujourd'hui, il n'en est plus de même, les engins de mouture sont assez puissants pour broyer en farine les roches les plus dures. Le poids de l'hectolitre du ciment ne donne donc guère d'indication. D'ailleurs, cet essai est généralement mal exécuté : on se borne, en effet, à déterminer le poids du litre; or, celui-ci n'est pas du tout le  $1/100^e$  du poids de l'hectolitre, le tassement dans ce dernier cas étant par le propre poids de la matière elle-même, beaucoup plus fort que dans le cas où l'on opère sur une mesure d'un litre.

Le second exemple de conditions contradictoires est le suivant :

On prescrit généralement que le ciment portland aura trois mois d'âge au moment de l'emploi, et en même temps on prescrit un poids spécifique minimum. Si le ciment doit séjourner trois mois en magasin ou en silo c'est pour être certain qu'il est éventé, c'est-à-dire que la chaux vive qu'il contenait après cuisson a eu le temps de se carbonater ou de s'hydrater.

Or, en absorbant  $\text{CO}_2$  ou  $\text{H}_2\text{O}$ , il est indubitable que le ciment a perdu une partie de son poids spécifique; et cette perte est en effet très sensible, comme le montrent les chiffres suivants, cités par H. Fajja, de Londres (1).

---

(1) *Transactions Society of engineers*, 1888.

CIMENTS	1	2	3	4
Poids spécifique à la réception	3.16	3.175	3.16	3.12
» » 1 mois après . . .	3.095	3.125	3.13	3.109
» » 3 » . . . . .	3.055	2.965	3.084	2.985
» » 6 » . . . . .	3.016	2.93	3.018	2.995
» » 9 » . . . . .	2.969	2.915	3.015	2.985

De ces quatre ciments, deux seraient indubitablement rebutés après trois mois d'emmagasinage, alors qu'ils satisfaisaient pleinement aux essais primitifs.

Dans ces expériences, il s'agit d'ailleurs de ciments conservés dans un laboratoire, donc plus ou moins secs, ce qui n'est pas le cas en pratique, le ciment étant remisé sur les chantiers, dans des magasins construits en bois et rarement bien secs; aussi en huit jours on constate alors des chutes de poids spécifique aussi importantes que celles qu'après trois mois seulement M. Faija a constatées.

Nous reviendrons d'ailleurs sur cette énervante question du poids spécifique.

Voici maintenant un exemple de prescriptions illogiques :

Les cahiers des charges prescrivent que la prise d'un ciment lent ne peut commencer avant une demi-heure par exemple, ce qui est fort juste; mais qu'elle ne peut se terminer avant 3 heures ni après 12 heures. Or, on sait qu'on ne doit plus manipuler du ciment gâché dès que la prise a commencé, afin de ne pas détruire le feutrage qui s'opère par l'enchevêtrement des cristaux résultant de la prise et du durcissement. Si l'on possède deux échantillons de ciment dont la prise de l'un commence après 40 minutes et se termine après 2 heures, et dont la prise de l'autre commence après 30 minutes et se termine après 3 heures, le premier ciment sera rebuté et le second accepté. Cepen-

dant, en pratique — toutes autres conditions égales d'ailleurs — le premier vaut mieux que le second, parce qu'il pourra être employé avec sécurité pendant 40 minutes après le gâchage, alors que le second à ce moment serait devenu inemployable.

Ces quelques lignes auront suffi, croyons-nous, à montrer le manque de logique qui a présidé souvent à l'élaboration des cahiers des charges.

Est-ce à dire qu'il n'y a plus d'épreuves à prescrire pour la réception du ciment? Non certes, nous pensons au contraire qu'il faut procéder à des essais nombreux, car la fabrication du ciment est délicate et journallement on débite d'énormes quantités de produits médiocres et même franchement mauvais. C'est donc un service à rendre autant aux fabricants eux-mêmes qu'aux consommateurs que d'être défiant dans cette matière; mais il faut rester logique avant tout et ne maintenir dans les cahiers des charges que ce qui est utile, les compléter même au besoin; mais après en avoir élagué toutes les prescriptions qui ne sont qu'inutiles et vexatoires.

D'un autre côté, il ne faut pas non plus, tout en reconnaissant l'utilité des essais, en exagérer l'importance, car malgré l'unification des appareils et des méthodes à employer pour apprécier les qualités du ciment, on constate encore des différences notables dans les résultats obtenus par plusieurs expérimentateurs travaillant séparément sur le même échantillon de ciment.

Voici un exemple typique à ce propos. Des échantillons d'un même ciment ont été envoyés à sept laboratoires, tous bien outillés et pourvus d'un personnel expérimenté; on trouvera ci-après les résultats qu'ils ont obtenu :

**Résultats des essais exécutés dans sept laboratoires sur un échantillon  
du même ciment.**

LABORATOIRES	FINESSE		PRISE		POIDS spécifique	RÉSISTANCE à la traction après 28 jours mortier 1 : 3		RÉSISTANCE à la compression après 28 jours mortier 1 : 3	
	900	5000	Début	Fin		A l'air	Sous l'eau	A l'air	Sous l'eau
						Kilog.	Kilog.	Kilog.	Kilog.
A . . . . .	0.2 o/o	11 o/o	4. <sup>48</sup>	8. <sup>10</sup>	—	29.6	28.7	257.6	261.3
B . . . . .	1 o/o	10.5 o/o	5. <sup>00</sup>	8. <sup>80</sup>	—	26.10	19.75	231.6	262.0
C . . . . .	0.5 o/o	15 o/o	—	3. <sup>80</sup>	—	—	21.30	—	240.0
D . . . . .	0.6 o/o	8.6 o/o	3. <sup>17</sup>	4. <sup>47</sup>	—	25.20	24.90	260.0	310.0
E . . . . .	0.1 o/o	8.1 o/o	3. <sup>51</sup>	5. <sup>28</sup>	—	27.40	23.40	311.0	303.0
F . . . . .	0.4 o/o	11.4 o/o	2. <sup>52</sup>	5. <sup>52</sup>	—	19.70	19.30	222.0	233.0
G . . . . .	0.15 o/o	4.1 o/o	—	6. <sup>05</sup>	3.064	31.30	21.60	259.0	247.0

Les essais d'invariabilité de volume ont donné de bons résultats dans tous les laboratoires.

Tous les laboratoires ont certainement constaté que le ciment était bon ; mais quels écarts dans leurs chiffres ! Si l'on compare maintenant ce travail des laboratoires, où tout est minutieusement mesuré et pesé, avec le travail grossier des chantiers, doit-on encore s'étonner des mécomptes que l'on a parfois éprouvés dans l'emploi du ciment et qui ont été souvent imputés à celui-ci lui-même ?

Il y a en Belgique, trois cahiers des charges principaux : celui du Génie militaire, celui de l'Administration des Chemins de fer et celui de l'Administration des Ponts et Chaussées.

Le premier contient le paragraphe suivant :

« Le ciment portland artificiel sera produit par la mouture de roches scorifiées, obtenues par la cuisson, jusqu'à commencement de vitrification, d'un mélange intime de carbonate de chaux et d'argile à l'exclusion de toute autre matière. »

Le second renferme encore actuellement une disposition analogue ; mais comme nous l'avons relaté plus haut, le Ministre des Chemins de fer, Postes et Télégraphes a abrogé cette clause en fait et admet l'emploi du ciment quel que soit son mode de fabrication, pour autant qu'il satisfasse à toutes les autres conditions du cahier des charges.

En attendant que le ministère de la Guerre en fasse autant, le ciment portland fabriqué au moyen des laitiers pourra être exclu des travaux du Génie militaire belge. Il y a déjà longtemps par contre que celui-ci a admis l'emploi du ciment de laitier (procédé à froid) pour certains travaux.

Remarquons en passant que le Génie prussien a employé d'énormes quantités de ciment portland de laitier, notam-

ment dans les fortifications de Metz, et que le Génie autrichien vient d'admettre, à la suite d'essais très sérieux, l'utilisation du même ciment portland.

D'ailleurs si la prescription rappelée ci-dessus était appliquée à la lettre, le Génie ne pourrait admettre aucun ciment ayant subi une addition de matières étrangères, aux roches cuites. Or, ce n'est un secret pour personne, que généralement pour régulariser la prise du ciment, on ajoute aux roches cuites, quelles que soient les matières premières employées dans la fabrication, 1 à 2 % de gypse avant la mouture. Cela se fait également dans les pays voisins et l'Association allemande des fabricants de ciment portland a expressivement admis cette addition. Un tel ciment ne devrait pas être admis par le Génie. On fait encore d'autres additions du reste, sur lesquelles nous n'insisterons pas. Nous avons montré plus haut, d'après M. le Dr Michaelis, combien on améliore un ciment destiné à l'eau de mer en y additionnant une pouzzolane, or, dans certains cas, le Génie a édifié des bétonnages soumis à des infiltrations d'eaux séléniteuses ; dans ces circonstances, une addition de matières pouzzolaniques, loin de devenir une cause d'exclusion, aurait beaucoup amélioré la qualité du ciment.

Quant au cahier des charges des Ponts et Chaussées, il ne renferme rien au sujet du mode de fabrication ou des matières premières à employer.

*Composition chimique.* — L'Administration des Chemins de fer a supprimé la clause stipulant une teneur de moins de 3 % en magnésie. Elle ne prescrit donc rien au point de vue de la composition chimique ; il en est de même au Génie militaire.

Quant à l'Administration des Ponts et Chaussées, elle prescrit que le ciment à prise lente, ne peut contenir plus de 2 % de magnésie et plus de 1,5 % d'acide sulfurique s'il s'agit de travaux à la mer. On remarque ici encore le

manque de précision qui existe dans les stipulations des cahiers des charges, l'un admettant jusqu'à 3 % de magnésie, et l'autre jusqu'à 2 % seulement. Cela montre le manque de fondement sur lequel de telles stipulations s'appuient.

D'ailleurs, certains auteurs nient qu'une teneur en magnésie, jusqu'à 5 %, même, puisse avoir le moindre effet. Le Dr Michaëlis, dans son mémoire déjà cité dit :

» La magnésie, élément tant critiqué, qui se précipite  
 » par la réaction de l'eau de mer, sur les mortiers hydrauliques et à laquelle on a attribué à tort les désagré-  
 » gations produites, constitue au contraire un moyen de  
 » préservation . . . . .

» Il y a donc lieu d'abandonner la théorie qui consiste à  
 » assigner aux sels de magnésie, une influence néfaste et  
 » de préciser en disant que l'acide sulfurique à l'état de  
 » sulfate soluble exerce seul une action nuisible. »

Quant à l'effet dû à la formation du sulfate de chaux provenant des 1.5 à 3 % d'acide sulfurique que le ciment portland de laitier peut contenir, il est bien minime, à côté de celui de l'énorme quantité de  $\text{CaSO}_4$ , qui se forme par la double décomposition du sulfate de magnésium; comme celui-ci, il sera d'ailleurs annihilé complètement grâce à l'addition de matières pouzzolaniques.

En résumé, pour un ciment destiné à être employé à l'eau de mer, les prescriptions relatives aux teneurs en magnésie et acide sulfurique peuvent être supprimées à la condition de prescrire une addition de laitier granulé, trass, etc., au ciment.

*Éventement.* — Pour l'Administration des Chemins de fer, le ciment doit avoir trois mois d'éventement et de plus le poids spécifique doit être compris entre 3.05 et 3.15. Nous avons vu que cela peut facilement être irréalisable, pour des ciments d'excellente qualité d'ailleurs.

Dans les autres cahiers des charges, il est prescrit d'approvisionner le ciment 40 jours au moins avant son emploi. Aux Ponts et Chaussées, il faut que le poids spécifique atteigne 3.05 au minimum, et au Génie 3.10 à 3.20. La remarque faite ci-dessus sur la diminution du poids spécifique à cause de l'éventement est encore applicable ici, si l'on attend l'expiration du délai des 40 jours avant de procéder à l'essai.

La comparaison des cahiers des charges à propos du poids spécifique est également suggestive; en effet, le Génie demande 3.10 à 3.20 et le Chemin de fer fixe le maximum du poids spécifique à 3.15!

*Poids spécifique.* — Cette prescription du poids spécifique est d'ailleurs la moins justifiée de toutes celles que les cahiers des charges contiennent.

Elle fut instituée anciennement dans l'unique but de dévoiler les fraudes usitées alors, et encore parfois aujourd'hui d'ailleurs, dans la fabrication du ciment portland au moyen des matières argileuses.

À cette époque, on mélangeait couramment à ce dernier des matières étrangères peu coûteuses, telles que du sable et du laitier non granulé; c'était une véritable falsification attendu que ces ajoutes ne répondaient à aucune nécessité technique. Les matières étrangères usitées ayant toutes un poids spécifique moindre que celui des roches cuites, celui du ciment fini diminuait dans de sensibles proportions. Or, aujourd'hui on falsifie encore parfois le ciment, mais on y ajoute outre les matières habituelles (sable, etc.) des matières très pondéreuses destinées à contrebalancer la diminution du poids due aux premières.

Ce moyen est même employé par des fabricants de ciment qui ne se livrent à aucune falsification autre, mais qui veulent par là parer à la perte de poids spécifique due à l'éventement.

Il est donc au moins bizarre de constater que la stipulation du poids spécifique qui a pour but de dévoiler les fraudes, est elle-même une cause de falsification. Il existe d'ailleurs un moyen très simple de supprimer cette pratique, c'est d'admettre que l'on maintienne le ciment dont on veut déterminer le poids spécifique, pendant plusieurs heures à une température de  $110^{\circ}$  C., afin d'expulser l'humidité qu'il contient. Cela se fait dans les laboratoires allemands ; en Belgique cela n'est pas toléré, vu le silence des cahiers des charges à ce sujet.

En résumé, la recherche du poids spécifique d'un ciment ne donne aucune indication, ni sur ses qualités, ni sur sa pureté.

Elle n'est prescrite qu'en Belgique et en France. En Allemagne, où l'industrie des ciments a fait le plus de progrès, les *normen* ne parlent pas du poids spécifique du ciment, pas plus d'ailleurs que de sa composition chimique ni que du poids de l'hectolitre.

Le faible poids spécifique d'un ciment peut provenir soit d'une cuisson insuffisante, soit de l'addition de matières étrangères. Dans le premier cas, les essais d'invariabilité de volume dévoileront la mauvaise qualité du ciment ; dans le second cas, les résistances seront faibles.

Du reste, si même un ciment falsifié répondait encore largement aux coefficients de résistance prescrits, nous avouons ne pas voir clairement le mal que son emploi pourrait causer ; il sera d'ailleurs toujours possible d'exiger des chiffres de résistance plus élevés si l'on constatait que la falsification est à craindre dans un cas spécial.

En ce qui concerne le ciment portland de laitier, les roches sortant du four ont une densité de 3.20 ; mais cette dernière s'abaisse rapidement par suite de l'événement et surtout par suite de l'ajoute de laitier au moment de la mouture.

*Durée de prise.* — Tous les cahiers des charges sont d'accord dans ce cas : ils prescrivent que la prise de ciment ne commencera pas avant 30 minutes et sera complète entre la 3<sup>e</sup> et la 12<sup>e</sup> heure. Il n'y a rien à objecter à ces exigences; par l'évènement des roches ou l'emploi du gypse on peut toujours satisfaire à ces conditions. Nous avons dit cependant, plus haut, comment elles peuvent aller à l'encontre de l'intérêt réel du consommateur.

*Finesse de mouture.* — Même accord des trois cahiers des charges. Généralement ils sont largement satisfaits sous ce rapport par tous les ciments du commerce; il est même très probable que si les fabricants se bornaient à moudre le ciment à la finesse tolérée (10 % de résidus au tamis de 900 mailles), ils ne parviendraient plus à obtenir, en mortier normal au moins, les résistances prescrites.

*Résistance.* — Pour la traction, le Génie prescrit, en mortier normal, 11 et 18 kilog. après 1 + 6 et 1 + 27 jours, et 28 et 38 kilog. dans les mêmes délais, pour le ciment pur.

L'Administration des Chemins de fer demande 8 et 15 kilog. pour le mortier normal et 25 et 35 kilog. pour le ciment pur; enfin, l'Administration des Ponts et Chaussées ne fait pas mention d'essais en ciment pur et prescrit 8 et 15 kilog. en mortier normal.

Pour la compression, au Génie et aux Ponts et Chaussées on exige en mortier normal :

90 kilog. après 1 + 6 jours.

et 160 » » 1 + 27 »

Quant aux essais en ciment pur, les trois cahiers des charges n'en parlent pas.

Aux Chemins de fer aucun essai à la compression n'est prescrit.

Il n'y a rien à objecter à ces exigences, qui n'ont rien d'exagéré. Les ciments portland de laitier dont nous avons

donné les résultats des essais ont largement satisfait à toutes ces stipulations.

*Invariabilité de volume.* — Le cahier des charges des Ponts et Chaussées ne prescrit aucun essai de ce genre. Celui des Chemins de fer stipule l'épreuve à la vapeur d'eau à 100°, pendant 6 heures consécutives. Quant à celui du Génie, il ordonne deux essais de conservation du ciment gâché : l'un pendant 27 jours dans l'eau froide, l'autre pendant 7 jours dans l'eau maintenue à une température uniforme de 80° C.

Il n'y a pas non plus d'observations à faire à ce propos ; ces épreuves ont leur raison d'être, seulement la dernière est malaisée et demande trop de surveillance. Nous pensons que l'essai à l'eau bouillante, pendant 6 heures consécutives, serait tout aussi efficace tout en étant beaucoup plus aisée.

Voilà, rapidement esquissée, toute la série des essais auxquels les cahiers des charges belges soumettent le ciment portland à prise lente. Cette série est déjà longue, comme on l'aura remarqué, et cependant on ne peut pas dire qu'elle soit complète. En effet, aucune épreuve n'a trait à la résistance du ciment à l'usure, à sa résistance à la flexion, à l'adhésion entre fer et ciment (deux questions que le développement rapide de l'emploi du ciment armé rend bien intéressantes), à la résistance du ciment à l'action de l'eau de mer, etc.

La détermination du rendement en mortier d'un ciment est aussi une question importante pour le consommateur, et à un autre degré que la connaissance du poids spécifique, de la finesse de mouture ou de la composition chimique de ce ciment. La détermination de ce rendement devrait donc faire partie des conditions de réception.

En résumé, nous pensons que les essais de prise, d'inva-

riabilité de volume et de résistance sont les seuls, parmi ceux que nous avons passés en revue, qui méritent d'appeler l'attention du consommateur de ciment. Les autres n'ont aucune signification quant à la qualité du produit, ils ne peuvent pas même servir à déterminer avec certitude le mode de fabrication de celui-ci, ni les matières premières employées — questions secondaires d'ailleurs qui ne pourraient tout au plus intéresser qu'un laboratoire s'occupant plutôt de recherches.

Un cahier des charges bien compris devrait donc éliminer ces essais de réception et conserver les trois épreuves citées plus haut (prise, résistance et invariabilité de volume), tout en prescrivant éventuellement, en outre, des conditions spéciales en corrélation avec le mode d'emploi du ciment : pavages, bétonnages à l'air, sous l'eau douce, ou sous l'eau de mer, etc., etc.

Les fabricants de ciment seront ainsi débarassés de certaines prescriptions réellement vexatoires, et ils pourront reporter sur l'étude des moyens d'amélioration de leurs produits l'ingéniosité qu'ils doivent déployer à présent pour naviguer sans naufrage parmi les récifs que représentent pour eux les stipulations souvent contradictoires des cahiers des charges.

Ceux-ci paraissent avoir moins pour but de reconnaître les qualités du ciment, que de l'obliger à s'identifier en tout aux ciments portland fabriqués anciennement. Ils créent donc un véritable monopole en faveur de ces derniers, et un monopole, quelle que soit l'industrie dont il s'agisse, est toujours un obstacle mis dans la voie des progrès à apporter à cette industrie.

## CONCLUSIONS

Cette étude aura, pensons-nous, au point de vue général, montré une fois de plus que l'on peut réellement fabriquer du ciment portland au moyen des laitiers, et que le produit obtenu répond largement, autant que le meilleur ciment ancien, à toutes les nécessités pratiques.

Au point de vue particulier des métallurgistes, cette fabrication résoud mieux que celle du ciment de laitier ordinaire, la question si importante de l'utilisation de cette encombrante matière, parce qu'elle n'exige pas un choix des laitiers aussi judicieux.

Si l'on considère, d'autre part, que les hauts-fourneaux reçoivent également le calcaire, le coke, etc., dans d'excellentes conditions, qu'ils peuvent par l'utilisation de moteurs à gaz disposer, à peu de frais, de quantités considérables de force motrice, on en conclura qu'ils sont mieux à même que tout autre industriel, d'entreprendre avec profits, la fabrication du ciment portland.

Liège, le 31 octobre 1902.

---