

COMMISSION INTERNATIONALE
DES GRANDS BARRAGES

Bureau Central Permanent :

51, rue Saint-Georges, PARIS-9^e

BULLETIN N° 15

RAPPORT PRÉSENTÉ PAR
LE SOUS-COMITÉ DU BÉTON

1960

AVERTISSEMENT – EXONERATION DE RESPONSABILITE:

Les informations, analyses et conclusions auxquelles cet ouvrage renvoie sont sous la seule responsabilité de leur(s) auteur(s) respectif(s) cité(s).

Les informations, analyses et conclusions contenues dans cet ouvrage n'ont pas force de Loi et ne doivent pas être considérées comme un substitut aux réglementations officielles imposées par la Loi. Elles sont uniquement destinées à un public de Professionnels Avertis, seuls aptes à en apprécier et à en déterminer la valeur et la portée et à en appliquer avec précision les recommandations à chaque cas particulier.

Malgré tout le soin apporté à la rédaction de cet ouvrage, compte tenu de l'évolution des techniques et de la science, nous ne pouvons en garantir l'exhaustivité.

Nous déclinons expressément toute responsabilité quant à l'interprétation et l'application éventuelles (y compris les dommages éventuels en résultant ou liés) du contenu de cet ouvrage.

En poursuivant la lecture de cet ouvrage, vous acceptez de façon expresse cette condition.

NOTICE – DISCLAIMER :

The information, analyses and conclusions referred to herein are the sole responsibility of the author(s) thereof.

The information, analyses and conclusions in this document have no legal force and must not be considered as substituting for legally-enforceable official regulations. They are intended for the use of experienced professionals who are alone equipped to judge their pertinence and applicability and to apply accurately the recommendations to any particular case.

This document has been drafted with the greatest care but, in view of the pace of change in science and technology, we cannot guarantee that it covers all aspects of the topics discussed.

We decline all responsibility whatsoever for how the information herein is interpreted and used and will accept no liability for any loss or damage arising therefrom.

Do not read on unless you accept this disclaimer without reservation.

RESISTANCE du BETON au GEL
Confrontation des Résultats obtenus
dans divers laboratoires

par **Marcel MARY**

Contrôleur Général de l'Équipement à Electricité de France

et **Jules CHAPELLE**

Ingénieur à Electricité de France

Dans le rapport n° 87 (question n° 19 - Cinquième Congrès des Grands Barrages - Paris 1955) les auteurs de la présente note ont relaté des séries d'essais tendant à montrer la supériorité des bétons de ciment de laitier sur les bétons de ciment Portland vis-à-vis de l'action des cycles alternés de gel et dégel.

Le Sous-Comité du Béton, estimant que ces conclusions présentaient un grand intérêt, a décidé de les soumettre à une enquête internationale, et, au cours de la réunion qui s'est tenue à Paris en même temps que le Congrès, a demandé aux auteurs d'expédier à tous les laboratoires qui en feraient la demande des échantillons de ciment analogues à ceux qui avaient fait l'objet de leurs propres expériences, en vue d'essais comparatifs, chaque laboratoire restant entièrement libre quant au choix des méthodes d'essais.

La présente note a pour objet de relater les résultats de cette confrontation.

Pour permettre une étude aussi efficace et complète que possible de ces résultats, les auteurs pensent qu'il est utile de commencer par exposer les conceptions de M. Chapelle sur la texture des ciments hydratés et ses hypothèses sur le mécanisme de la destruction des bétons sous l'effet des cycles alternés de gel et de dégel. Cette méthode présentera deux avantages ; le premier sera de soumettre ces hypothèses au crible des résultats obtenus jusqu'à ce jour ; le second sera de suggérer aux expérimentateurs les essais complémentaires cruciaux nécessaires pour les confirmer ou les infirmer. Au cours de la réunion du Sous-Comité du Béton qui s'est tenue à Helsinki le 30 mai 1959, les laboratoires qui ont déjà collaboré à cette étude et quelques autres laboratoires supplémentaires ont bien voulu déclarer s'intéresser à cette question. La présente note leur donnera les sujets de réflexion et d'études nécessaires.

**NOTE RESUMANT LES CONCEPTIONS DE M. CHAPELLE
(France) SUR CERTAINS ASPECTS DE LA RESISTANCE DES
BETONS AUX CYCLES ALTERNES DE GEL ET DEGEL EN
FONCTION DE LA NATURE DU CIMENT**

Les conceptions de l'auteur, soumises à la discussion sont résumées comme suit :

1° Le classement des ciments, au point de vue de la résistance aux cycles alternés de gel et dégel des bétons fabriqués avec ces ciments, ne semble dépendre :

- ni de la résistance mécanique à la compression du ciment ;
- ni de sa finesse de mouture ;
- ni de sa composition chimique, ni de sa structure minéralogique en phase *anhydre*.

L'auteur pense que ce classement doit être principalement en rapport avec la structure du ciment en phase *hydratée*.

Il admet que la phase hydratée est cristalline et que le ciment hydraté et durci est composé d'un enchevêtrement d'aiguilles de silicate monocalcique hydraté extrêmement fines, de quelques angströms de longueur, dans lequel peuvent s'insérer des poches de gros cristaux de chaux hydratée ou de sulfoaluminat de calcium hydraté.

Le ciment Portland contient une proportion importante de ces cristaux de chaux ; le ciment à forte teneur en laitier de hauts fourneaux n'en contient pratiquement pas ; le ciment sursulfaté contient des poches de sulfoaluminat de calcium hydraté ; les ciments pouzzolaniques contiennent des cristaux de chaux qui s'éliminent lentement, au fur et à mesure de l'absorption de la chaux par la silice.

L'examen par diffraction aux rayons X met en évidence la présence de ces gros cristaux, alors qu'il ne permet pas de déceler la présence des cristaux de silicate monocalcique du fait de leurs très faibles dimensions, ce qui provoque un élargissement des raies, qui deviennent floues et peu visibles.

2° L'auteur rappelle que la cohésion de la pâte de ciment hydratée et durcie est imputable :

- à des forces d'origine ionique (cohésion des cristaux) ;
- à des forces d'origine mécanique (enchevêtrement des cristaux) ;

— à des forces d'origine thermodynamique, pression osmotique et dépression capillaire, mettant en compression le squelette constitué par les cristaux hydratés et en traction (pression négative) la phase liquide continue baignant les cristaux.

Les pressions osmotiques et dépressions capillaires sont d'autant plus grandes que les capillaires ont un diamètre plus petit.

Pour une pâte donnée, l'expérience montre que la cohésion augmente avec le rapport $\frac{C}{E}$; on en déduit que les capillaires ont des diamètres décroissants lorsque $\frac{C}{E}$ croît ; l'auteur pense que la dimension des cristaux diminue parallèlement.

Il pense d'autre part que le diamètre des capillaires est beaucoup plus grand dans les poches de cristaux de chaux hydratée ou de sulfoaluminat de calcium hydraté que dans l'enchevêtrement d'aiguilles de silicate monocalcique hydraté.

Il pense enfin que, lorsque le ciment *anhydre* contient un peu de chaux libre, cette chaux constitue des germes de cristallisation pour la chaux libérée par l'hydratation. Il estime que, plus les grains de chaux libre de la phase *anhydre* sont petits et dispersés, plus les cristaux de chaux *hydratée* sont petits, et plus les capillaires sont de dimensions réduites.

3° En ce qui concerne le mécanisme de la destruction par les cycles alternés de bel et dégel, l'auteur pense que le facteur principal de désagrégation réside dans les forces d'expansion dues au gel de l'eau dans les capillaires.

Il rappelle que la température de solidification de l'eau dans ces capillaires est d'autant plus basse qu'ils sont plus étroits.

Pour la plupart des corps, les relations donnant la température de fusion en fonction de la pression est la suivante :

$$p = a \left[\left(\frac{T}{T_0} \right)^c - 1 \right]$$

où T_0 est la température de fusion pour une pression nulle ;

c une constante peu différente de 2 pour les substances non métalliques ;

a la pression négative à exercer sur le solide pour le liquéfier au zéro absolu.

(L'auteur rappelle que les forces d'expansion ne peuvent provoquer de ruptures internes que si, dans les cycles successifs, il y a apport d'eau extérieure. Si le béton est isolé du milieu extérieur, la totalité de l'expansion produite par le gel de l'eau interne se produit

au cours du premier gel, et les cycles suivants n'ont plus aucun effet supplémentaire. Or les bétons ne se détruisent pas au premier gel.)

Il existe d'autres facteurs de désagrégation provenant en particulier de la différence dans les coefficients de dilatation des corps constituant le béton et des gradients de température, mais l'auteur pense que ces facteurs sont de bien moindre importance que le gel de l'eau dans les pores.

A la lumière de ces conceptions générales et de l'analyse de la contexture des pâtes de ciment durci, l'auteur estime que les phénomènes suivants devraient être constatés, si les hypothèses sont exactes :

1° Les ciments qui contiennent des poches de cristaux de chaux hydratée ou de sulfoaluminate de calcium hydraté doivent donner des bétons plus sensibles aux cycles alternés de gel et dégel que ceux qui n'en contiennent pas. La température qu'il faut atteindre pour geler l'eau dans les capillaires est en effet moins basse dans ces poches que dans l'enchevêtrement des aiguilles de silicate monocalcique hydraté, du fait des dimensions différentes des capillaires.

2° Si, malgré la présence de ces poches, les capillaires sont assez petits pour que l'eau ne puisse pas y geler à la température de l'essai, ces poches deviennent inoffensives. L'auteur estime que c'est ce qui se produit lorsque le rapport $\frac{C}{E}$ dépasse une certaine valeur, qu'il évalue à $2,25 \pm 0,25$. Dans ce cas, il n'y a pas de différence notable de comportement entre les différents ciments.

Les destructions sont alors uniquement produites par les actions mécaniques décrites au dernier alinéa du § 3° du chapitre précédent ; les éprouvettes se désagrègent en prenant superficiellement un aspect feuilleté caractéristique, en tendant à prendre la forme sphérique plus apte à résister aux contraintes dues aux gradients de température.

Plus le rapport $\frac{C}{E}$ augmente, plus les chutes de résistance au cours des cycles alternés de gel et dégel diminuent, et plus les allongements sont faibles.

3° Si le rapport $\frac{C}{E}$ est assez faible pour que l'eau interstitielle puisse geler, plusieurs cas peuvent se présenter :

- a) le ciment ne contient que des aiguilles de silicate monocalcique hydraté. L'auteur pense que, les capillaires étant répartis d'une manière homogène et uniforme, les aiguilles glissent les unes par rapport aux autres sans entraîner de microfissuration à l'intérieur de la phase continue du silicate hydraté.

Par contre des microfissures se produisent au contact des agrégats du fait des variations dimensionnelles de la phase continue du silicate hydraté.

On conçoit que les pertes de résistance ne soient pas en relation simple avec les allongements et que les éprouvettes se détruisent en tendant à prendre la forme sphérique, comme dans le cas décrit au deuxième alinéa du § 2°.

- b) le ciment contient des poches de cristaux de chaux hydratée ou de sulfoaluminat de calcium hydraté. L'auteur pense que,

plus le rapport $\frac{C}{E}$ diminue, plus le diamètre des poches aug-

mente. Le gel de l'eau commençant dans ces poches, un gradient apparaît dans les déformations internes de la phase continue du silicate hydraté, donc des contraintes internes, d'autant plus élevées que le diamètre des poches est plus grand ; une microfissuration interne se produit. Le pourcentage de chute de

résistance doit être une fonction du rapport $\frac{C}{E}$. D'autre part,

comme la destruction résulte de contraintes internes dans la phase continue du silicate hydraté, il ne doit pas y avoir de corrélation bien nette entre les allongements et le nombre de cycles de gel et dégel au moment de la destruction.

Enfin, les éprouvettes se désagrègent en éclatant en petits blocs.

- c) le ciment contient des poches de cristaux de chaux hydratée qui sont ensuite progressivement fixées par de la silice soluble (ciments pouzzolaniques). La résistance aux cycles alternés de gel et dégel doit augmenter avec le temps de durcissement préalable, alors qu'il ne doit pas en être de même pour le ciment Portland. C'est effectivement ce qu'on constate, lorsqu'on ajoute des cendres volantes très actives ;

- d) la présence de petites quantités de chaux dans le Portland anhydre doit être défavorable ; cette chaux se comporte en effet comme des germes de cristallisation vis-à-vis de la chaux hydratée libérée par la réaction de prise du ciment ; son état de division revêt, de l'avis de l'auteur, une importance considérable, car il pense que les dimensions des poches de cristaux de chaux hydratée en dépendent.

Il en résulte que les bétons de ciment Portland doivent donner des résultats beaucoup moins cohérents, aux essais de gel, que les

bétons de ciment de laitier. Pour le ciment Portland, la dispersion de la chaux dans la phase anhydre dépend du silotage, au cours duquel se produit une hydratation et une carbonatation. D'autre part la quantité de chaux libre dans la phase anhydre varie suivant la composition et le traitement du cru ; elle est variable d'un ciment à l'autre et elle s'abaisse, par exemple, lorsque la proportion de fondant augmente (C⁴ AF).

- e) Enfin, l'auteur pense que le principal effet des agents entraîneurs d'air n'est pas, comme on le dit généralement, un effet de vase d'expansion. Sans nier ce mécanisme, il pense que leur action essentielle est de diviser les feuilletts de chaux hydratée existant dans la phase anhydre. Il en voit pour preuve le fait constaté que certains de ces agents efficaces vis-à-vis des bétons de ciment Portland, n'ont aucun effet sur les bétons de ciment de laitier.

COMPTE RENDU DES ESSAIS EFFECTUES PAR DIVERS LABORATOIRES SUR DES ECHANTILLONS DE CIMENT IDENTIQUES

Les laboratoires ci-après ont collaboré à ces essais :

- 1° Le Laboratoire d'Aix-en-Provence de la Région d'Equipe-
ment Hydraulique Alpes III d'Electricité de France (France).
- 2° Le laboratoire der Oesterreichischen Zementfabrikanten à Vienne
(Autriche).
- 3° Le laboratoire du Cement-och-Betong à Limhamn (Suède).
- 4° Le laboratoire de la Société des Chaux et Ciments de Lafarge
et du Teil (France).
- 5° Le laboratoire de la Région d'Equipe-ment Hydraulique Alpes II
d'Electricité de France à Albertville (France).
- 6° Le laboratoire du Centre d'Etudes et de Recherches des Liants
Hydrauliques à Paris (France).
- 7° Le laboratoire de Sottocastello de la S.A.D.E. et le laboratoire
de Sondrio de Falck (Italie).
- 8° Le laboratoire de la Japan Cement Engineering Association à
Tokyo (Japon).

Pour alléger le texte de la présente note, tous les tableaux donnant les caractéristiques des ciments et bétons ainsi que les résultats des essais sont reportés en annexe.

Une première série d'essais a porté sur les ciments dont les caractéristiques figurent aux tableaux n° 1a, 1b et 1c.

Les ciments A et B sont des ciments Portland de la classe 250/315 (Norme Française AFNOR) ; ils se différencient par leur teneur en chaux libre déterminée par dissolution de la chaux en milieu alcoolique par la glycérine. Le ciment A est un ciment à haute teneur en silice. Le ciment B est un ciment spécial pour travaux maritimes ; il contient moins de chaux libre que le ciment A.

Les ciments C - D - E sont des ciments de hauts fourneaux concernant 30 % de ciment Portland A et 70 % de laitier broyé à trois finesses différentes. Il a été demandé d'ajouter à l'eau de gâchage 1,50 % de chlorure de calcium par rapport au poids de ciment.

Le ciment F est un ciment de laitier sursulfaté contenant :

- 2 % de ciment Portland,
- 15 % de gypse,
- 83 % de laitier broyé à une finesse de mouture moyenne.

Le ciment G est un ciment de laitier catalysé à la soude et contenant :

- 97 % de laitier broyé à une finesse de mouture moyenne,
- 3 % de soude caustique en paillettes ajoutée à l'eau de gâchage.

Le ciment H est un ciment sulfopouzzolanique quaternaire.

Le ciment I est un ciment de laitier à base de cendres de lignite calcaires contenant :

- 60 % de laitier granulé,
- 40 % de centres volantes provenant de la combustion de lignite pulvérisé du Bassin de Provence dans les chaudières des centrales thermiques du Cap Pinède et Gardanne (Bouches-du-Rhône). Il a été demandé d'ajouter à l'eau de gâchage 1,50 % de chlorure de calcium par rapport au poids du ciment.

Le ciment J est un ciment alumineux fabriqué par la Société des Chaux et Ciments de Lafarge et du Teil.

— Les laboratoires qui ont accepté de participer aux essais ne s'étant pas fait connaître immédiatement, il n'a pas été possible d'expédier à tous les laboratoires des échantillons provenant d'une même fabrication.

Pour cette raison, deux fabrications supplémentaires ont dû être faites, et les ciments correspondants portent les indices *bis* et *ter* (tableaux lb et lc).

— Les caractéristiques portées sur les tableaux la, lb, lc ont été déterminées par le laboratoire d'Aix-en-Provence, suivant les normes françaises. Les essais mécaniques en mortier 1/3 ont été faits avec un C/E constant et égal à 2,31, sauf pour le ciment alumineux pour lequel C/E = 2,52.

— Les ciments H₁ *bis* et H₂ *bis* ont été fabriqués en vue d'essais complémentaires effectués par le laboratoire du Teil.

Une deuxième série d'essais a porté sur les ciments dont les caractéristiques figurent au tableau n° 2.

Le ciment 1 est un ciment Portland à haute teneur en silice.

Le ciment 2 est un ciment Portland spécial pour travaux à la mer.

Le ciment 3 est un ciment Portland ordinaire.

Le ciment 4 est un ciment de laitier sursulfaté.

Le ciment 5 est un ciment de hauts fourneaux contenant 30 % de ciment Portland et 70 % de laitier.

Dans cette deuxième série d'essais, on a demandé aux différents laboratoires d'étudier trois valeurs du rapport C/E soit 1,25 - 1,60 et 2,00.

Dans les deux séries d'essais, les laboratoires ont choisi à leur gré la méthode d'expérimentation.

**RESULTATS OBTENUS PAR LE LABORATOIRE
D'AIX-EN-PROVENCE
DE LA REGION D'EQUIPEMENT HYDRAULIQUE ALPES III
D'ELECTRICITE DE FRANCE (France)**

1. METHODES D'ESSAIS

Les essais ont été effectués sur des pâtes de ciments, amaigries à l'aide de quantités variables de sable de Leucate (essentiellement quartzeux), broyé à la finesse du ciment. La quantité d'eau de gâchage pour les différents mélanges a été maintenue constante de manière à obtenir une plasticité à peu près identique d'un échantillon à l'autre.

En faisant varier les proportions relatives de ciment et de sable broyé, on a pu couvrir une gamme très étendue pour la valeur du rapport ciment/eau.

Le malaxage et la mise en place dans les moules ont été mécanisés (malaxeur Hobard et girateur Couillaud) pour éliminer au maximum la dispersion des résultats.

On a fabriqué des cubes de 5 cm de côté pour les essais à la compression et des prismes de 3 × 3 × 10 cm pour les mesures de variation de longueur.

Les éprouvettes ont été soumises à l'essai de gel après 21 jours de durcissement dans l'eau à +20°. Le gel a été réalisé dans une chambre parcourue par de l'air froid à — 20° et le dégel dans l'eau à +20°. Les cycles ont été les suivants : quatre heures le matin à — 20° ; deux heures à +20°, quatre heures à — 20° ; quatorze heures à +20°. Elles étaient maintenues à +20° chaque semaine du samedi à 12 heures au lundi à 8 heures.

Des éprouvettes témoins ont été conservées dans l'eau à +20°.

Les essais de rupture à la compression ont été effectués après un certain nombre de cycles de gel et dégel sur des groupes de cubes comprenant quatre éprouvettes ayant subi l'épreuve de gel et dégel et quatre éprouvettes témoins.

Les mesures de variation de longueur ont été effectuées sur les prismes, à l'aide du rétractomètre L'Hermite-Meynier, une fois par semaine, le samedi après-midi.

2. FIDELITE DES ESSAIS

On a vu qu'il n'a pas été possible d'expédier aux différents laboratoires des ciments provenant de la même fabrication pour la première série d'essais, ce qui est le cas pour les ciments de laitier au clinker D. Le tableau n° 3 montre que les différents échantillons de ces ciments ont un comportement tout à fait semblable. On en conclut également que la méthode d'essai utilisée est fidèle.

3. RESULTATS D'ENSEMBLE DES ESSAIS

a) *Comportement comparé du ciment de laitier au clinker et du ciment Portland pour diverses valeurs du rapport C/E.*

Les tableaux n°s 4, 5, 6, 7 mettent en évidence le fait que le comportement du ciment de laitier est beaucoup moins influencé par l'excès d'eau de gâchage que celui des ciments Portland.

C'est ainsi qu'à partir de $C/E \approx 0,75$, le ciment de laitier D se comporte convenablement à 50 cycles, alors que pour les divers échantillons de ciment Portland A, Bter et Ater, il faut que le rapport C/E atteigne 1,75 ou 2,00 pour que la chute de résistance soit de l'ordre de 50 % (tableau n° 4).

Le phénomène évolue d'une manière parallèle en fonction du nombre de cycles (tableaux n°s 5, 6 et 7).

b) *Classement des ciments.*

Les tableaux n°s 8, 9, 10, 11, 12 et 13 donnent pour l'ensemble des ciments étudiés les classements que l'on obtient pour des valeurs de C/E de 1,5 - 1,75 et 2,00. Ces tableaux montrent :

- a) que le ciment de laitier sursulfaté F et le ciment sulfopouzzolanique quaternaire H sont ceux qui résistent le moins bien à l'épreuve du gel ;
- b) que, quelle que soit la valeur de C/E le ciment alumineux J et le ciment de laitier catalysé à la soude G sont ceux qui résistent le mieux ;
- c) que, pour une valeur de C/E égale à 1,5 les ciments de laitier au clinker C, D, E sont supérieurs aux ciments Portland A et B ; puis au fur et à mesure que la valeur de C/E augmente, les résultats se rapprochent, puis s'inversent ;
- d) que, pour les ciments de laitier au clinker, la finesse n'a qu'une influence très faible.

c) *Allongements.*

Les tableaux n^{os} 14, 15 et 16 donnent les résultats obtenus pour les ciments Portland A et B et le ciment de laitier au clinker D.

Les allongements diminuent lorsque le rapport C/E augmente. Mais la valeur de l'allongement qui correspond à la destruction n'est pas un chiffre fixe.

d) *Influence des additions pouzzolaniques.*

Le tableau n^o 17 montre l'amélioration que l'on peut attendre de l'ajoute de cendres volantes finement broyées au ciment Portland. On voit que cette amélioration est d'autant plus grande que le durcissement initial est plus important, alors que l'augmentation du temps de durcissement du ciment Portland n'a pratiquement pas d'influence sur sa tenue aux cycles de gel et dégel.

Ceci est une preuve de plus de la nocivité de la chaux hydratée, qui se trouve peu à peu fixée par la pouzzolane.

e) *Air occlus.*

Le tableau n^o 18 montre que l'addition d'un agent entraîneur d'air améliore la résistance aux cycles de gel et dégel du ciment Portland, mais n'a aucune influence sur la tenue des ciments de laitier.

f) *Deuxième série d'essais.*

Le tableau n^o 19 donne les résultats de la deuxième série d'essais. Ces résultats confirment le classement obtenu au cours de la première série.

On peut noter une tendance du ciment Portland n^o 2 spécial pour travaux à la mer à mieux résister pour des valeurs élevées du rapport C/E que les ciments Portland à haute teneur en silice n^o 1 et ordinaire n^o 3.

4. CONCLUSIONS

Dans l'ensemble, les résultats obtenus au laboratoire d'Aix s'inscrivent dans les hypothèses générales exposées précédemment, notamment en ce qui concerne :

- le rôle néfaste du sulfoaluminate de chaux hydratée ;
- le rôle défavorable de la chaux hydratée, surtout lorsque le rapport C/E est faible, rôle mis en évidence par l'influence nettement moindre d'un excès d'eau de gâchage sur les ciments de laitier que sur les ciments Portland et également par l'action progressive des pouzzolanes ;
- la différence de comportement de l'air occlus entre les ciments de laitier et les ciments Portland.

**RESULTATS OBTENUS PAR LE LABORATOIRE
DER OESTERREICHISCHEN ZEMENTFABRIKANTEN
A VIENNE (Autriche)**

1. METHODES D'ESSAIS.

La détermination des résistances mécaniques des différents ciments a été effectuée d'après les normes usitées en Autriche et qui sont identiques aux normes allemandes (DIN 1 164).

Pour suivre les dégradations dues à l'alternance des cycles de gel et dégel, on a confectionné des prismes normalisés munis de petits plots de mesures suivant la technique imposée par les normes allemandes pour les mesures de retrait.

Les primes ont été soumis à l'essai de gel après 28 jours de durcissement dans l'eau à + 20°. Le gel a été réalisé dans une chambre parcourue par de l'air froid à — 21° et le dégel dans l'eau à + 20°. Les cycles ont été les suivants : quatre heures à — 21° ; une heure à + 20° ; quatre heures à — 21° ; quinze heures à + 20°.

L'opération a été conduite sur 100 cycles, les mesures d'expansion étant effectuées tous les 20 cycles.

2. RESULTATS DE LA PREMIERE SERIE D'ESSAIS.

Le tableau n° 20 donne l'ensemble des résultats. Remarquons que le mortier des prismes soumis aux cycles de gel et dégel a été confectionné avec un rapport C/E = 1,66. Dans ce tableau, les ciments sont classés par ordre décroissant quant à leur tenue aux cycles de gel et dégel.

Comme dans les essais du laboratoire d'Aix-en-Provence, le ciment de laitier sursulfaté et le ciment sulfopouzzolanique sont ceux qui résistent le moins à l'épreuve de gel et dégel.

Le ciment alumineux se comporte très bien.

Les ciments de laitier se classent après ; le moins bon est le ciment à base de cendres de lignite.

Les ciments Portland donnent deux résultats opposés ; le ciment B pour travaux maritimes est le meilleur de toute la série ; le ciment A à haute teneur en silice se classe parmi les plus mauvais.

En ce qui concerne les ciments de laitier, la finesse semble avoir un effet favorable. De plus, malgré une forte expansion, les

éprouvettes en ciment de laitier D et E (mouture moyenne et mouture fine) sont encore très bien conservées après 100 cycles.

On voit ainsi que la mesure des variations de longueur ne semble pas permettre d'établir un classement de valeur pour des ciments de nature très diverse, si on ne prend pas la précaution de poursuivre les essais jusqu'à l'apparition de signes de destruction visibles. Cette observation rejoint celle qui a été faite au laboratoire d'Aix.

Ajoutons enfin que le seul résultat qui soit en désaccord avec les résultats obtenus à Aix concerne le ciment Portland B pour travaux maritimes qui, ici, apparaît exceptionnellement bon.

3. RESULTATS DE LA DEUXIEME SERIE D'ESSAIS.

Le tableau n° 21 donne l'ensemble des résultats des essais effectués pour trois valeurs différentes du rapport C/E, soit : 1,25 — 1,6 — 2,00. Si on se limite à l'examen visuel de l'apparition des dégradations sans essayer d'établir un classement fonction, pour un nombre de cycles de bel et dégel donné, de l'importance des allongements on voit que le ciment sursulfaté et les ciments Portland n° 1 et 3 sont les plus mauvais. Le ciment Portland n° 2 spécial pour travaux maritimes a un comportement analogue au ciment de laitier au clinker. On voit que les mesures d'allongement des deux séries d'essais donnent pour le ciment de laitier des résultats tout à fait comparables, alors qu'il n'en est pas de même pour les ciments Portland.

4. CONCLUSIONS.

Dans l'ensemble, le classement obtenu est très comparable à celui obtenu à Aix ; les ciments qui résistent le moins bien sont le ciment sursulfaté et le ciment sulfo-pouzzolanique quaternaire ; le ciment alumineux se comporte très bien.

On peut noter tout particulièrement que les résultats des essais effectués avec le ciment Portland sont beaucoup plus dispersés que ceux qui ont été effectués avec le ciment de laitier. On peut y voir l'indice de l'effet de la chaux libre contenue dans le ciment anhydre, comme il est exposé dans les hypothèses générales. On remarque en particulier que les ciments B et n° 2 pour travaux maritimes, qui ne contiennent respectivement que 0,4 % et 0,7 % de chaux libre se comportent très bien, alors que les ciments A, 1 et 3 qui contiennent respectivement 1,49 %, 1,05 % et 1,32 % ont une mauvaise tenue.

**RESULTATS OBTENUS PAR LE LABORATOIRE
DE CEMENT-GCHT-BETONG à LIMHAMN (Suède)**

1. METHODES D'ESSAIS.

Les éprouvettes soumises aux cycles de gel et dégel ont été des prismes de 100 × 100 × 400 mm de béton dosé à 300 kg de ciment par mètre cube avec C/E = 1,59. Les proportions du mélange étaient les suivantes :

1	partie en poids de ciment,
2,86	» sable 0 - 5 mm,
1,76	» pierre concassée 12 mm,
1,76	» pierre concassée 18 mm.

Les éprouvettes ont été conservées en atmosphère humide pendant 24 heures, puis dans l'eau pendant 27 jours. Elles ont été ensuite placées dans des récipients galvanisés de 105 × 105 × 500 mm remplis d'eau. Ces récipients ont été mis alternativement pendant 2 h 50 dans des solutions à -15° et $+15^{\circ}$; le temps nécessaire pour passer d'une solution à l'autre était de 10 minutes. On effectuait une fois par semaine une mesure du coefficient d'élasticité dynamique et on arrêtait l'essai lorsque ce module avait perdu 50 % de sa valeur d'origine.

2. RESULTATS (Première série seulement).

Les essais ont porté uniquement sur les éléments A, B, C, D, E, F (deux ciments Portland, ciment de laitier à trois moutures différentes, ciment de laitier sursulfaté).

Le tableau n° 22 donne les résultats de ces essais.

Les plus mauvais résultats concernent le ciment de laitier sursulfaté F et le ciment Portland A qui, dans sa phase anhydre, contient 1,49 % de chaux libre.

Ensuite vient le ciment Portland B (0,4 % de chaux libre) spécial pour travaux maritimes.

Les ciments de laitier au clinker C - D - E sont ceux qui se sont le mieux comportés, le ciment C à mouture grossière étant le moins bon des trois.

3. CONCLUSIONS.

On voit que les résultats de ces essais sont en bonne concordance avec ceux qui ont été obtenus à Aix et à Vienne et s'inscrivent dans les hypothèses générales.

**RESULTATS OBTENUS PAR LE LABORATOIRE
DE LA SOCIETE DES CHAUX ET CIMENTS DE LAFARGE
ET DU TEIL (France)**

1. PREMIERE SERIE D'ESSAIS.

Les essais ont porté sur un ciment de laitier au clinker *D bis*, un ciment de laitier sursulfaté *F bis*, un ciment de laitier à base de cendres de lignite *I bis*, deux ciments Portland A et B, un ciment sulfopouzzolanique quaternaire *H bis*.

Ils ont été réalisés sur des prismes de 14 × 14 × 56 cm en béton d'agrégats de Seine dosé à 300 kg de ciment par mètre cube, avec C/E = 1,5.

Après 7 jours de durcissement dans l'eau à + 18°, les éprouvettes ont été placées dans des récipients galvanisés remplis d'eau. Ces récipients ont été placés alternativement dans des solutions à — 20° pendant 6 heures et + 20° pendant 18 heures.

Après 25 cycles de gel et dégel, les éprouvettes ont été essayées à la flexion et à la compression et on a comparé les résistances obtenues aux résistances d'éprouvettes témoins conservées dans l'eau à + 18° depuis le début de l'essai de gel. Les résultats trouvés sont les suivants :

<i>D bis</i> — Ciment de laitier au clinker	106 %
<i>I bis</i> — Ciment de laitier à base de cendres	79 %
<i>F bis</i> — Ciment de laitier sursulfuré	68 %
B — Ciment Portland prise mer	43 %
A — Ciment Portland	50 %
<i>H bis</i> — Ciment sulfopouzzolanique quaternaire ...	0 %

De plus, pour deux compositions différentes de ciment sulfopouzzolanique quaternaire, les essais ont été repris en portant le temps de durcissement préalable de 7 à 28 jours et avec deux valeurs de C/E = 1,5 et 1,8. Dans tous les cas, les éprouvettes ont été complètement désagrégées au bout de 25 cycles.

2. DEUXIEME SERIE D'ESSAIS.

Les essais ont porté sur les ciments n° 1 (à haute teneur en silice), n° 2 (prise mer), n° 3 (Portland normal), n° 4 (sursulfaté), n° 5 (laitier au clinker avec 1 % CaCl²).

Le tableau n° 23 donne les essais mécaniques et l'analyse chimique.

Ils ont été réalisés sur des prismes de 7 × 7 × 28 cm en béton avec du sable de Seine 0-2 mm et du gravier de Seine 2-15 mm et pour diverses valeurs de C/E = 1,25 - 1,6 et 2. Pour conserver aux bétons une maniabilité correcte avec toutes les valeurs de C/E, les dosages ont été les suivants :

C/E = 1,25 dosage 200/600/600,
 C/E = 1,60 » 300/400/800,
 C/E = 2,00 » 400/400/800.

La mise en place du béton était réalisée par vibration sur table Sinex de fréquence 3.000 hertz et d'amplitude 0,38 mm pendant une minute et demie, à raison de deux prismes simultanément.

Les prismes, conservés pendant 24 heures dans un placard humide sous feuille de chlorure de polyvinyle, puis démoulés, ont été placés pendant 28 jours dans l'eau à 18-20°.

Deux primes sont laissés dans l'eau comme témoins, deux autres soumis à 25 cycles de gel à l'eau à - 25° et de dégel à l'eau à + 25°, à raison d'un cycle par jour.

Au bout de 25 cycles, on a mesuré la chute de résistance à la compression des prismes ayant subi l'essai par rapport à la moyenne des résistances à la compression des quatre demi-prismes témoins. Les résultats en pourcentage P de ces chutes de résistance ont été les suivants :

Nature du ciment	C/E = 1,25		C/E = 1,60		C/E = 2,00	
	Air occlus %	P %	Air occlus %	P %	Air occlus %	P %
Portland n° 1 (haute teneur en silice).	5,0	77	2,3	57,5	1,9	63
Portland n° 2 (prise en mer)	5,7	61	2,3	45	2,2	35,3
Portland n° 3	5,3	77	2,7	56	2,5	57,5
Sursulfaté n° 4	4,4	73	1,9	54,5	2,0	37
Laitier n° 5	4,8	51,5	2,3	42	2,2	35,8

3. EXAMEN DES RESULTATS ET CONCLUSIONS.

Dans les deux séries d'essais, le ciment de laitier au clinker se classe en tête.

Dans la première série d'essais, le ciment Portland prise mer

a eu une tenue un peu plus faible que celle de l'autre ciment Portland ; dans la deuxième série, il s'est mieux comporté que les autres ciments Portland, et il a eu une tenue légèrement plus faible que le ciment de laitier pour les faibles valeurs de C/E et une tenue égale à celle du ciment de laitier pour les valeurs élevées de C/E.

Ces anomalies semblent confirmer la dispersion inhérente aux essais effectués sur des ciments Portland.

On constate de plus que, dans la première série d'essais, le ciment de laitier a continué à durcir malgré l'épreuve de gel et de dégel, alors que, dans la deuxième série, il a subi une altération appréciable.

On pourrait attribuer cette différence de comportement au fait que les températures de gel n'ont pas été les mêmes dans les deux cas : — 20° et — 25°.

Mais M. Lhopitalier pense que la supériorité du ciment de laitier par rapport au ciment Portland, constatée lorsque les éprouvettes sont soumises jeunes à l'essai de gel et dégel, diminue lorsque le temps de conservation préalable augmente. La différence entre les deux séries d'essais proviendrait donc de ce que, dans la première série, le temps de conservation préalable a été de 7 jours, alors qu'il a été de 28 jours dans la deuxième série. Les essais qu'il a effectués lui ont montré que, plus le temps de durcissement initial augmente, plus la tenue des ciments de laitier est affectée et que la comparaison avec le ciment Portland s'inverse au bout d'un certain temps de conservation. Il y a là un sujet de recherches qui nous semble très important.

Enfin, le ciment de laitier sursulfaté a donné des résultats très différents de ceux constatés dans les laboratoires précédents ; dans la première série d'essais, il ne s'est pas mal comporté ; dans la deuxième, il a eu une tenue comparable à celle des ciments Portland 1 et 3 pour les valeurs faibles de C/E et une tenue comparable à celle du ciment Portland 2 pour travaux maritimes et à celle du ciment de laitier pour les valeurs élevées de C/E.

**RESULTATS OBTENUS PAR LE LABORATOIRE DE LA REGION
D'EQUIPEMENT HYDRAULIQUE ALPES II D'ELECTRICITE
DE FRANCE A ALBERTVILLE (France)**

Ce laboratoire n'a participé qu'à la deuxième série d'essais et pour deux valeurs de $C/E = 1,25$ et $1,60$.

1. METHODES D'ESSAIS.

Les essais ont été effectués sur des prismes de $14 \times 14 \times 56$ cm en béton de granulométrie Faury 0 — 40 mm dosés à 250 kg de ciment par mètre cube. Les agrégats étaient des gneiss.

Les éprouvettes, conservées pendant 21 jours dans une ambiance à hygrométrie saturée à $+ 20^\circ$, ont été ensuite soumises à l'essai de gel dans une chambre parcourue par un courant d'air froid à $- 20^\circ$, le dégel s'effectuant dans l'eau à $+ 20^\circ$.

Les cycles comportaient 12 heures à $- 20^\circ$ et 12 heures à $+ 20^\circ$.

Les dégradations étaient suivies en mesurant une fois par semaine la vitesse de propagation d'une onde.

2. RESULTATS.

Le tableau n° 24 donne les résultats obtenus.

Quelle que soit la valeur du rapport C/E , le ciment de laitier au clinker n'a subi qu'une très faible altération.

Les plus mauvais résultats ont été obtenus avec le ciment de laitier sursulfaté et le ciment Portland n° 1 à haute teneur en silice.

Le ciment Portland n° 2 (prise mer) et le ciment Portland n° 3 (ordinaire) ont eu un comportement semblable au ciment Portland n° 1 pour $C/E = 1,25$ et un comportement bien meilleur pour $C/E = 1,6$; ils se sont cependant révélés inférieurs au ciment de laitier.

Ces résultats sont en bon accord avec ceux des laboratoires précédents, sauf toutefois en ce qui concerne le ciment Portland n° 3, dont le comportement est, cette fois, supérieur à celui du ciment Portland n° 1. On peut, une fois de plus, attribuer ce fait à la dispersion propre aux essais réalisés avec les ciments Portland.

**RESULTATS OBTENUS PAR LE LABORATOIRE DU CENTRE
D'ETUDES ET DE RECHERCHES DES LIANTS HYDRAULIQUES
A PARIS (France)**

1. PREMIERE SERIE D'ESSAIS.

Sur les dix ciments reçus par ce laboratoire, on a effectué les déterminations suivantes : poids spécifique, surface spécifique, eau de gâchage de la pâte pure pour la consistance normale et durée de prise. Ces résultats sont rassemblés dans le tableau n° 25.

Pour chaque liant, on a confectionné 12 prismes de $4 \times 4 \times 16$ cm en mortier CEM — Bureau Rilem avec C/E = 2. Le malaxage a été effectué mécaniquement au malaxeur Bouvard, une minute à sec, quatre minutes après addition de l'eau contenant, suivant les cas, CaCl_2 ou NaOH. On a déterminé l'étalement à la table à secousses allemande (tableau n° 25) ; le serrage a été fait pendant cinq minutes au girateur Couillaud. Les éprouvettes ont été conservées en atmosphère humide pendant 24 heures.

La longueur, le poids et le module d'élasticité dynamique (évalué d'après la fréquence propre de vibration des éprouvettes) ont été déterminés sur chaque éprouvette, puis ces dernières ont été immergées jusqu'à 28 jours.

A cet âge, on a déterminé de nouveau la longueur, le poids et le module d'élasticité, puis on a rompu trois éprouvettes en flexion et en compression. Les neuf autres ont été placées dans une armoire frigorifique réglée à -19° , où elles sont restées 15 heures ; elles ont été ensuite immergées dans l'eau à $19-20^\circ$ pendant le reste de la journée, ainsi que les samedis et dimanches.

Tous les dix cycles, les mesures non destructives ont été faites sur les trois éprouvettes de chaque liant destinées à être conservées le plus longtemps.

Lorsqu'un liant manifestait un affaiblissement sensible, deux éprouvettes restantes étaient mesurées, puis rompues en flexion et compression.

Tous les cinquante cycles, jusqu'à épuisement des éprouvettes, et quel que soit leur état, les mêmes essais étaient faits sur deux éprouvettes de chaque liant.

a) *Variation de poids.*

Cette détermination ne renseigne pas utilement sur l'altération, car en même temps que l'éprouvette gonfle et se gorge d'eau, elle

commence à s'effriter et la somme de ces variations perd toute signification.

b) *Résistances mécaniques.*

La résistance à la traction est beaucoup plus rapidement affectée par le gel que la résistance à la compression ; elle donne des résultats intéressants. Pour les liants réputés non gélifs par l'essai de gonflement, il y a gain de résistance à cinquante cycles. La résistance à la compression n'est vraiment affectée que pour les ciments qui gonflent le plus.

c) *Gonflement.*

Des gonflements très importants sont obtenus pour les ciments ayant une mauvaise tenue.

Ce laboratoire estime que la mesure du gonflement réunit le maximum de qualités : elle n'est pas destructive et permet une appréciation sur des éprouvettes relativement altérées, alors que la mesure du module d'élasticité par la fréquence propre de vibration devient impossible quand elles sont fissurées.

d) *Module d'élasticité.*

Les éprouvettes perdent rapidement leur faculté de vibrer en résonance quand elles sont fissurées.

e) *Aspect.*

L'aspect visuel corrobore les déterminations numériques.

Les résultats concernant ces différentes déterminations sont rassemblés dans les tableaux n^{os} 26, 27, 28, 29.

Le ciment de laitier sursulfaté F et le ciment sulfopouzzolanique H ont eu le plus mauvais comportement.

Les ciments Portland A et B et le ciment alumineux J ont eu le meilleur comportement.

Le ciment de laitier à la soude G et les trois ciments de laitier au clinker C, D, E qui ne se sont pas d'ailleurs classés dans l'ordre des finesses croissantes, ont un classement intermédiaire.

Etant donné la valeur élevée du rapport C/E, ces résultats ne sont pas en contradiction avec les résultats obtenus dans les laboratoires précédents.

Il convient de noter la très grande différence constatée entre les gonflements des ciments Portland et ceux des ciments de laitier, les gonflements importants subis par ces derniers n'étant pas accompagnés de chutes anormales de résistance mécanique. Le même phénomène a été constaté dans les essais effectués à Vienne.

2. DEUXIEME SERIE D'ESSAIS.

Pour cette deuxième série d'essais, le laboratoire n'a effectué que des essais mécaniques à la compression.

Le tableau n° 30 en donne les résultats.

Les deux ciments ayant le plus mauvais comportement sont le ciment Portland n° 1 à haute teneur en silice et le ciment de laitier sursulfaté n° 4. Les ciments les meilleurs sont le ciment Portland n° 2 spécial pour travaux maritimes et le ciment de laitier au clinker n° 5.

Par rapport au classement obtenu à Aix-en-Provence, il semble y avoir une interversion entre le ciment Portland n° 2 et le ciment de laitier au clinker n° 5. A cette correction près, les classements s'établissent dans le même sens.

**RESULTATS OBTENUS PAR LE LABORATOIRE
DE SOTTOCASTELLO DE LA S.A.D.E. ET LE LABORATOIRE
DE SONDRIO DE FALCK (Italie)**

1. METHODES D'ESSAIS.

On a confectionné pour chaque type de ciment six prismes de $20 \times 20 \times 60$ cm en béton d'agrégats naturels de la rivière Piave, suivant la courbe de Faury ($A = 27$ $D_{\max} = 40$ mm), au dosage de 250 kg par mètre cube. La quantité d'eau de gâchage a été déterminée de manière à obtenir la même maniabilité pour tous les échantillons. Pour l'ensemble des essais, le rapport C/E a été supérieur à 2,00.

Les éprouvettes ont été conservées pendant 54 jours en atmosphère saturée dans une salle à 20° , puis pendant deux jours dans l'eau à 20° . Trois prismes ont été soumis ensuite à l'alternance des cycles de gel dans l'air et dégel dans l'eau, les trois autres prismes étant conservés comme témoins dans l'eau.

Les cycles de gel et dégel ont été les suivants : quatre heures à $+ 20^\circ$; huit heures à $- 20^\circ$; 12 heures à $+ 20^\circ$; quatre heures à $- 20^\circ$.

Après 25, 50, 75 et 100 cycles, on a déterminé le module d'élasticité dynamique par la mesure de la fréquence de vibration longitudinale de l'éprouvette. Après 100 cycles, les prismes ont été soumis à rupture par flexion, puis compression sur des cubes de 20 cm provenant de l'essai de flexion.

Quatre cubes ayant subi les cycles de gel et dégel et quatre cubes témoins ont été ainsi soumis à l'essai de compression et deux autres à l'essai de perméabilité en même temps que deux cycles témoins.

2. RESULTATS DE LA PREMIERE SERIE D'ESSAIS.

Avec les dix types de ciment, on a préparé des éprouvettes de mortier suivant les normes de réception italiennes ; les résultats de ce contrôle sont donnés dans le tableau n° 31.

Les résultats concernant les résistances aux cycles de gel et dégel sont rassemblés dans le tableau n° 32.

Le tableau ci-après résume les classements obtenus en ce qui concerne le module d'élasticité dynamique et les résistances à la traction et à la compression. Les pourcentages indiqués dans ce

tableau représentent le rapport des valeurs obtenues après épreuve de gel aux valeurs relevées sur les éprouvettes témoins.

Rappelons les désignations des ciments :

- A et B = Ciments Portland
- C, D, E = Ciments de laitier de moutures diverses
- F = Ciment sursulfaté
- G = Ciment de laitier à la soude
- H = Ciment sulfopouzzolanique
- I = Ciment de laitier à base de cendres de lignite
- J = Ciment alumineux

Module dynamique										
	F	B	G	A	J	E	C	D	I	H
%	95,4	94,8	92,9	92	89,9	86,5	85,1	80,8	46,7	22,7

Traction										
	F	B	G	C	A	E	J	D	H	I
%	116	102	85,4	80,2	79,6	79,6	72	71,5	55,6	48,2

Compression										
	J	G	F	B	E	A	C	I	D	H
%	98,5	96,7	96,5	94	92,8	91,5	88	83,3	79,2	67,2

On constate que ces trois classements ne sont pas profondément différents, et que, à l'exception des ciments I et H, les pourcentages de chute sont faibles, ce qui ne permet pas d'établir un ordre bien caractéristique. Ceci peut provenir de la forte valeur du rapport C/E.

La principale différence avec les essais précédents réside dans le fait que le ciment sursulfaté s'est très bien comporté.

3. RESULTATS DE LA DEUXIEME SERIE D'ESSAIS.

Les essais ont été effectués seulement pour deux valeurs de C/E : 1,25 et 2 et l'appréciation des résultats a été faite uniquement par la mesure du coefficient d'élasticité dynamique.

Le tableau n° 33 donne l'ensemble des résultats.

Pour C/E = 2, les cinq ciments ont donné des résultats très voisins, avec une altération minime.

Pour C/E = 1,25, l'altération est également faible, à l'exception du ciment de laitier sursulfaté et du ciment de laitier au clinker.

A l'exception du ciment de laitier sursulfaté, ces résultats ne concordent pas avec ceux qui ont été obtenus dans les laboratoires précédents.

**RESULTATS OBTENUS PAR LE LABORATOIRE DE LA JAPAN
CEMENT ENGINEERING ASSOCIATION A TOKYO (Japon)**

1. PREMIERE SERIE D'ESSAIS.

Les tableaux n^{os} 34, 35, 36, 37, 38 et 39 donnent les caractéristiques des ciments et bétons essayés.

Notons que les essais de ciment ont été effectués sur mortier 1/3 avec C/E = 2,00 et le sable naturel siliceux du district de Soma (plus de 93 % de silice) gradué comme suit :

de 0,008 mm à 0,15 mm	5 %
de 0,15 mm à 0,5 mm	25 %
de 0,5 mm à 1,2 mm	57 %
de 1,2 mm à 1,7 mm	10 %
au-dessus de 1,7 mm	3 %

La préparation du mortier a été faite à $20 \pm 0,5$ degrés, avec 85 % d'humidité ; la conservation à $20 \pm 0,2$ degrés ; à raison de trois prismes de $4 \times 4 \times 16$ cm pour chaque ciment.

Les éprouvettes d'essai du béton ont été cylindriques, de 10×20 cm.

Les échantillons de béton soumis aux essais de gel et dégel ont été des prismes de $10 \times 7,5 \times 40$ cm à raison de trois éprouvettes pour chaque ciment ; le malaxage à la bétonnière a duré trois minutes après l'introduction de l'eau ; les éprouvettes ont été conservées 24 heures en chambre humide, puis dans l'eau potable à 20° après démoulage.

La méthode utilisée pour les essais de gel et dégel entre 0 ou 5° et -18° n'a pas été indiquée.

Le tableau n^o 40 donne le poids W des échantillons, la valeur du module d'élasticité dynamique E et le pourcentage restant P_c de ce module d'élasticité après N cycles de gel et dégel.

Les expérimentateurs, tout en estimant qu'il n'est pas possible d'ériger des règles générales en raison du nombre restreint des essais, pensent toutefois que l'on peut formuler les conclusions suivantes :

1° *En considérant la tenue au gel des différents types de liant d'après les valeurs du module d'élasticité, les ciments de laitier (C D E) ont montré une meilleure résistance que les autres types de liant (F H I) tandis que le ciment sulfopouzzolanique (H) a donné les plus mauvais résultats.*

2° *Le ciment Portland (B) à faible teneur en chaux fut de loin plus résistant que le ciment Portland (A) à haute teneur de chaux.*

En général, le Portland à faible teneur en chaux et le ciment de laitier semblent donner une meilleure résistance que le ciment à forte teneur en chaux ; ainsi, la résistance au gel pourrait être caractérisée dans une certaine mesure par la quantité de chaux.

Ce laboratoire a obtenu dans l'ensemble le même classement que celui du Centre d'Etudes et de Recherches des Liants Hydrauliques (France), ces deux laboratoires ayant effectué les essais pour $C/E = 2$ environ.

Le seul résultat qui ne soit pas en accord concerne le Portland A qui est, ici, classé comme très mauvais.

2. DEUXIEME SERIE D'ESSAIS.

Les tableaux n^{os} 41, 42, 43, 44 et 45 donnent les caractéristiques des ciments et bétons essayés.

Les essais de ciment ont été effectués sur des éprouvettes de $4 \times 4 \times 16$ cm en mortier 1/3 de quartz naturel à grains ronds (96 % de silice) avec $C/E = 2,00$; la granulométrie du sable a été la suivante :

de 0,105 mm à 0,294 mm	1 part
de 0,294 mm à 0,590 mm	2 parts
de 0,590 mm à 1,190 mm	7 parts

Les essais de gel ont été effectués sur des prismes de $10 \times 7,5 \times 40$ cm de béton conservés 24 heures en salle humide, puis 20 jours dans l'eau potable à 20°. La méthode utilisée pour les essais de gel entre 0 ou 5° et — 17° n'a pas été indiquée.

Le tableau n° 46 donne le poids W , le module d'élasticité dynamique E et les pourcentages restants W_R et P_C de ces deux valeurs après N cycles de gel et dégel.

Les expérimentateurs font les observations suivantes :

Ces essais ont donné des résultats sur la résistance au gel, qui diffèrent notablement de ceux obtenus lors de la première série d'essais.

La corrélation avec la quantité de chaux contenue dans le ciment Portland n'est pas aussi bonne qu'il avait été prévu.

Il est à noter que cette divergence sur la détérioration est due au trop pauvre curing des ciments d'essais, spécialement dans le cas d'un E/C supérieur, c'est-à-dire que les éprouvettes d'essais étaient âgées de 21 jours et leur durcissement n'était pas assez avancé pour donner une meilleure durabilité en comparaison avec ceux des essais faits à un âge plus avancé.

Quelles que soient les raisons, les essais des éprouvettes de forme prismatique dans les conditions de l'essai ont donné les résultats suivants :

1° Si l'on considère la teneur en chaux, le ciment Portland n° 1 à grande teneur en chaux donne la plus mauvaise résistance, quel que soit le E/C employé. Le ciment Portland n° 2 particulièrement pauvre en chaux donne apparemment de meilleurs résultats que le n° 1, alors que le n° 3 avec une teneur en chaux modérée, malgré la présence d'une quantité de chaux libre plus élevée, donne comparativement de bons résultats.

2° Les bétons exécutés avec différents types de ciments, n'offrent ni un grand effet à la résistance au gel, ni une différence marquée sur la perte de poids des éprouvettes.

3° Une plus grande différence de finesse de tous les types de ciments n'a apparemment aucune corrélation avec les effets du gel.

4° On peut conclure qu'aucune décision ne peut être prise jusqu'à ce que tous les essais nécessaires aient été faits dans les différentes étapes du durcissement du béton et essentiellement pour les rapports E/C élevés. (Les essais sont à commencer lorsque les éprouvettes ont au moins 21 jours, 35 jours... d'âge) en prenant ainsi en considération les relations existant entre les conditions du laboratoire et celles du chantier.

A part cela, inutile de dire que la qualité d'un ciment n'est pas déterminée par la simple analyse chimique. Différents problèmes concernant ces facteurs comme le contrôle insuffisant exercé pendant les étapes des procédés dites de cuisson et de clinkérisation qui affectent la qualité du ciment et la tenue du béton. A ce point de vue, il semble nécessaire en même temps d'étudier la structure minéralogique du clinker à partir duquel est fabriqué le ciment.

Lorsque l'on compare l'ensemble des résultats de cette deuxième série d'essais à ceux de la première série, on est frappé par le fait que, quels que soient la nature du ciment et la valeur du rapport C/E, il a suffi de quelques cycles de gel et de dégel pour réaliser la destruction des éprouvettes, alors qu'au cours de la première série d'essais, il a fallu plusieurs dizaines de cycles pour obtenir une destruction appréciable.

Les expérimentateurs japonais émettent l'hypothèse que le temps de durcissement initial, soit 21 jours est insuffisant ; ils n'ont pas donné le temps de durcissement initial des éprouvettes de la première série d'essais. Cette hypothèse ne concorde pas avec l'ensemble des résultats des autres laboratoires.

Les ciments de cette deuxième série d'essais semblent cependant avoir conservé toute leur qualité malgré la distance de transport, puisque les résistances mécaniques des éprouvettes sont comparables à celles de la première série d'essais.

CONCLUSIONS

Dans l'ensemble, ces procès-verbaux d'essais ont incontestablement un air de famille. Il y a bien entendu quelques notes discordantes, qui ont été signalées au passage et qui appelleraient un examen plus approfondi. Mais, étant donné l'extrême variété des méthodes d'essais, et la complexité du problème, il n'était guère possible *a priori* d'imaginer une identité complète des résultats.

Il ne faut d'ailleurs pas oublier que toutes les mesures qu'on peut faire sur le béton comportent des dispersions, dont la valeur est loin d'être négligeable, et qu'en matière d'essai au gel, cette dispersion est particulièrement élevée.

Mais on a bien l'impression que, dans l'ensemble, les hypothèses émises au début de ce rapport et concernant le mécanisme de la désagrégation permettent d'expliquer la plupart des résultats obtenus :

Influence nocive du sulfoaluminat de calcium ;

Influence de la chaux libre contenue dans le ciment Portland anhydre, les petites variations de la quantité totale et de la dissémination dans la masse pouvant être rendues responsables de la dispersion des résultats ;

Influence de la chaux hydratée dans la phase hydratée ;

Difficulté de classer les ciments lorsque le rapport C/E est très élevé.

Les auteurs de la présente note adressent tout d'abord leurs plus vifs remerciements à tous les Ingénieurs qui ont bien voulu participer à ce travail en commun, mettant ainsi en évidence combien peut être fructueuse une telle collaboration amicale.

Ils estiment que la meilleure manière de continuer dans cette voie consiste, à la lumière des résultats obtenus dans cette première phase de travail, à émettre des hypothèses d'ensemble sur les textures et les mécanismes de transformation de ces textures, puis à soumettre ces hypothèses au crible d'épreuves cruciales que chacun peut organiser à sa guise, et au gré de sa propre imagination.

C'est dans cet esprit qu'ils soumettent à la critique de chacun les hypothèses générales émises par M. Chapelle et développées au début de ce rapport, souhaitant que nombreux soient ceux qui apporteront des documents expérimentaux confirmant ou infirmant ces hypothèses.

FROST RESISTANCE OF CONCRETE
Comparaison of results obtained
in different laboratories

by **Marcel MARY**

Contrôleur Général de l'Équipement à Electricité de France

et **Jules CHAPELLE**

Ingénieur à Electricité de France

In report n° 87 (question 19 - Fifth Congress on Large Dams - Paris 1955) the authors of the present paper reported on a series of tests, tending to show the superiority of concrete made with slag cements over concrete made with Portland cement when subjected to alternating cycles of freezing and thawing.

The Concrete Sub-Committee decided that the conclusions of these tests were extremely interesting and should be made the subject of an international survey. During a meeting of the Committee in Paris, at the time of the Congress, the authors were asked to send samples of cement, similar to those they had used for their investigation, to any laboratory prepared to make comparative tests, each laboratory remaining entirely free as regards the choice of test methods.

The present paper will give the results of this comparison.

In order to make it possible to study these results in the most useful way, the authors think it would be advisable to start with an outline of M. Chapelle's concepts about the texture of hydrated cements and his assumptions regarding the mechanism of the destruction of concrete under the action of alternating cycles of freezing and thawing. This procedure will have two advantages. The first will be to examine these assumptions in the light of the results obtained so far and the second to help research workers in deciding what additional decisive tests are necessary to confirm or disprove these assumptions. In the course of the meeting of the Concrete Sub-Committee at Helsinki, on May the 30th 1959, the laboratories that had already taken part in the investigation and a few other laboratories notified the Sub-Committee of their interest in this question. The present note will provide them with the necessary subjects for examination and study.

**NOTE SUMMARIZING THE CONCEPTS DEVELOPED BY
M. CHAPPELLE (France) ON CERTAIN ASPECTS OF THE
RESISTANCE OF CONCRETE TO ALTERNATING CYCLES OF
FREEZING AND THAWING AS A FUNCTION OF THE NATURE
OF THE CEMENT WITH WHICH THEY ARE MADE**

The concepts of the author, submitted for discussion, may be summarized as follows :

1) The classification of cements according to the resistance of concretes, made with these cements, to alternating cycles of freezing and thawing, does not seem to depend on :

- the mechanical compressive strength of the cement ;
- nor on the fineness of grinding ;
- nor on the chemical composition or the mineralogical structure in the *anhydrous* phase.

The author thinks that the classification must be connected mainly with the structure of the cement in the *hydrated* phase.

He accepts that the hydrated phase is crystalline and that hydrated and hardened cement is composed of a tangled mass of very fine hydrated monocalcium silicate needles, with a diameter of a few angströms and a length of several hundred angströms, among which pockets of coarse hydrated lime or hydrated sulphoaluminate of lime crystals may occur.

Portland cement contains a high proportion of lime crystals ; cements with high blast-furnace slag contents contain hardly any lime crystals ; supersulphated cements contain pockets of hydrated sulphoaluminate of lime ; pozzolana cements contain lime crystals that disappear gradually as the lime is absorbed by the silica.

X-ray examination by diffraction reveals the presence of these large crystals but does not reveal that of monocalcium silicate crystals because of their very small size, which results in a broadening of the lines, making them blurred and difficult to see.

2) The author recalls that the cohesion of hydrated and hardened cement paste may be attributed to :

- forces of ionic origin (cohesion of crystals) ;
- forces of mechanical origin (entanglement of crystals) ;
- forces of thermodynamic origin, osmotic pressure and capillary depression putting into compression the skeleton

formed by the hydrated crystals and in tension (negative pressure) the continuous liquid phase surrounding the crystals.

The osmotic pressures and capillary depressions are higher when the diameter of the capillaries is smaller.

For any given paste, experience shows that cohesion increases with the C/W ratio, from which it may be deduced that the diameter of the capillaries decreases when the C/W ratio increases. The author thinks that the size of the crystals decreases at a similar rate.

He also thinks that the diameter of the capillaries is much greater in the pockets of hydrated lime or hydrated sulpho-aluminate of lime crystals than in the tangled masses of hydrated monocalcium silicate needles.

Finally, he thinks that, when the *anhydrous* cement contains a little free lime, this lime represents "germs" for the crystallization of the lime released during hydration. In his opinion, the more the particles of free lime in the *anhydrous* phase are small and dispersed, the smaller the *hydrated* lime crystals and the smaller the size of the capillaries.

3) As regards the mechanism of destruction by alternating cycles of freezing and thawing, the author thinks that the main disintegration factor is the expansion forces due to freezing of the water in the capillaries.

He recalls that the temperature of solidification of water in these capillaries is lower when the capillaries are narrower.

For most bodies, the relation showing the temperature of fusion as a function of pressure is the following :

$$p = a \left[\left(\frac{T}{T_0} \right)^c - 1 \right]$$

where T_0 is the temperature of fusion at zero pressure ;

c is a constant very near to 2 for non-metallic substances ;

a is the negative pressure to be exerted on a solid in order to liquefy it to absolute zero.

(The author recalls that expansion forces can cause internal disruption only when water is brought in from the outside in the course of successive cycles. If the concrete is insulated from the outside the whole of the expansion due to freezing of internal water takes place during the first freezing and the following cycles have no additional effect. Concrete does not fail during the first freezing, however.)

There are other disintegration factors connected, more particularly, with the difference in the coefficients of expansion

of the constituents of concrete and with temperature gradients, but the author thinks these factors are much less important than the freezing of water in the pores.

In view of these general concepts and of analysis of the texture of hardened cement, the author thinks that, if the assumptions are correct, the following phenomena should be observed :

1) Cements containing pockets of hydrated lime or hydrated calcium sulphoaluminate crystals should produce concretes that are more sensitive to alternating cycles of freezing and thawing than those made with cements free of these crystals. Because of the difference in size of the capillaries, the temperature that has to be reached to freeze the water in the capillaries would be lower in such pockets than in the tangled masses of hydrated monocalcium silicate.

2) If, in spite of the presence of such pockets, the capillaries are small enough to prevent the water from freezing in them at the temperature of the tests, the pockets become harmless. The author is of the opinion that this is what happens when the C/W ratio exceeds a certain value, which he estimates at 2.25 ± 0.25 . In this case there is no particular difference in the behaviour of the various cements.

Destruction is then entirely due to the mechanical action described at the end of 3) in the previous chapter ; the specimens disintegrate and show a very characteristic flaky surface in tending to assume a spherical shape better suited to stand up to the stresses due to temperature gradients.

The more the C/W ratio increases, the smaller is the loss of strength during the alternating cycles of freezing and thawing and the elongation.

3) If the C/W ratio is sufficiently low to allow freezing of the pore water, a number of cases may occur :

a) the cement contains only hydrated monocalcium silicate needles. The author thinks that, since the capillaries are uniformly and homogeneously distributed, the needles slide in relation to each other without causing any micro-cracking inside the continuous phase of the hydrated silicate.

On the other hand, micro-cracks occur at contact with the aggregate because of the dimensional variations of the continuous phase of the hydrated silicate.

It seems quite possible that the strength losses should not be in direct ratio to the elongations and that the specimens fail in

ending to assume a spherical shape as in the case described above under No. 2.

- b) The cement contains pockets of hydrated lime or hydrated sulphoaluminate crystals. The author thinks that the diameter of these pockets increases for decreasing C/W ratios. Since water starts freezing in these pockets, a gradient appears in the internal deformations of the continuous phase of the hydrated silicate, i.e. in the internal stresses and it is the more pronounced the greater the diameter of the pockets ; the result is internal microcracking. The percentage strength loss must be a function of the C/W ratio. On the other hand, since failure is due to internal stresses in the continuous phase of the hydrated silicate there cannot be any clearly defined correlation between the elongations and the number of cycles of freezing and thawing at failure.

Finally, the specimens disintegrate through spalling into small blocs.

- c) The cement contains pockets of hydrated lime crystals that are subsequently gradually fixed by the soluble silica (pozzolana cements). Resistance to alternating cycles of freezing and thawing should increase with increasing time of previous hardening, but the same would not apply to Portland cement. And this is, in fact, what has been observed when very active fly ash is added.
- d) The presence of small amounts of lime in the anhydrous Portland cement must have an unfavourable effect since the lime acts as crystallization germs in relation to the hydrated lime released by the setting reaction. In the author's opinion, its state of division is extremely important because he thinks that it determines the size of the pockets of hydrated lime crystals.

As a result, Portland cements must give far less consistent results in the freezing tests than slag cements. For Portland cement, the distribution of lime in the anhydrous phase depends on conditions during storage in the silos when a certain amount of hydration and carbonation takes places. On the other hand, the amount of free lime in the anhydrous phase varies according to the composition and the treatment of the raw cement ; it varies from one cement to the next and decreases, for instance when the proportion of flux (C⁴ AF) increases.

- e) Finally, the author thinks that the main effect of air entraining agents is not, as generally accepted, a question of an expanding effect. Without denying this effect, the author thinks the main role of these agents is to divide the hydrated lime flakes occurring in the anhydrous phase. He thinks that observations to the effect that such agents are efficient for concretes made with Portland cement and have no effect on concrete made with slag cement proves the point.

**REPORT ON THE TESTS CARRIED OUT BY DIFFERENT
LABORATORIES ON SIMILAR CEMENT SAMPLES**

The Following laboratories have taken part in the tests :

- 1) The laboratory of Aix-en-Provence of the " Région d'équipement hydraulique Alpes III " of the " Electricité de France " (France).
- 2) The laboratory of the " Oesterreichischen Zementfabrikanten " at Vienna (Austria).
- 3) The laboratory of the " Cement och-Betong " at Limhamn (Sweden).
- 4) The laboratory of the " Société des Chaux et Ciments de Lafarge et du Teil " (France).
- 5) The laboratory of the " Région d'équipement hydraulique Alpes II " of the " Electricité de France " at Albertville (France).
- 6) The laboratory of the " Centre d'Etudes et de Recherches des Liants Hydrauliques " in Paris (France).
- 7) The Sottocastello laboratory of the S.A.D.E. and the Sondrio laboratory of the Falck (Italy).
- 8) The laboratory of the Japan Cement Engineering Association at Tokyo (Japan).

In order to make the text of the present note more easily readable, all the tables showing the characteristics of cements and concretes and the test results are given in an Appendix.

A first series of tests used cements the characteristics of which are shown in tables la, lb and lc.

Cements A and B are Portland cements of the 250/315 class (French Standards AFNOR). They have different free lime contents determined by dissolution of the lime by glycerine in an alcohol medium. Cement A is a cement with a high silica content. Cement B is a special cement for work exposed to sea-water ; it has a lower free lime content than cement A.

Cements C - D - E are blast furnace slag cements containing 30 % of Portland cement A and 70 % of slag ground to three different finenesses. It was decided to add 1.50 % of calcium chloride, in relation to the weight of cement, to the mixing water.

Cement F is a supersulphated slag cement containing :

- 2 % Portland cement,
- 15 % gypsum,
- 83 % slag ground to medium fineness.

Cement G is a soda activated slag cement containing :

- 97 % slag ground to medium fineness,
- 3 % caustic soda in small flakes added to the mixing water.

Cement H is a quaternary sulpho-pozzolana cement.

Cement I is a slag cement with a base of calcareous lignite ash, containing :

- 60 % granulated slag,
- 40 % fly ash from the burning of pulverised lignite from the Provence Basin in the boilers of the power stations at Cap Pinède and Gardanne (Bouches-du-Rhône). A request was made to add 1.50 % of calcium chloride — in relation to the weight of cement — to the mixing water.

Cement J is a high alumina cement manufactured by the “ Société des Chaux et Ciments de Lafarge et du Teil ”.

— Since the various laboratories that accepted to carry out the tests had not made their intention known immediately it was not possible to send them all samples from the same batch.

For this reason, two additional batches were manufactured and the cements in question are marked with indices “ bis ” and “ ter ” (tables lb and lc).

— The characteristics shown in tables la, lb and lc have been determined by the Aix-en-Provence laboratory according to the French standard specifications. The mechanical tests on 1/3 mortar have been carried out with uniform C/W ratio, equal to 2.31 except in the case of the high alumina cement for which the C/W ratio is equal to 2.52.

Cements H₁ bis and H₂ bis have been manufactured for the purpose of additional tests carried out by the du Teil laboratory.

A second series of tests was made with the cements whose characteristics are given in table 2.

Cement 1 is a Portland cement with high silica content.

Cement 2 is a special Portland cement for work in sea-water.

Cement 3 is an ordinary Portland cement.

Cement 4 is a supersulphated slag cement.

Cement 5 is a blast furnace slag cement containing 30 % Portland cement and 70 % slag.

For this second series, the laboratories were asked to study three values of the C/W ratio : 1.25 - 1.60 and 2.00.

The laboratories had a completely free choice of testing methods for both series.

**RESULTS OBTAINED BY THE AIX-EN-PROVENCE
LABORATORY OF THE « REGION D'EQUIPEMENT
HYDRAULIQUE ALPES III » OF THE « ELECTRICITE
DE FRANCE » (France)**

1. TEST METHODS.

The tests were carried out on cement pastes made leaner by the addition of varying amounts of Leucate sand (a mainly quartz sand), ground to cement fineness. The amount of mixing water was kept constant for the various mixes in order to achieve nearly the same degree of plasticity for all the samples.

By varying the relative amounts of cement and ground sand, it has been possible to cover a very wide range of C/W ratio values.

Mixing and placing in the moulds was done mechanically (Hobard mixer and Couillaud gyrator apparatus) in order to reduce dispersion of the results as much as possible.

The compression tests were made on 5 cm cubic specimens and the variation in length was measured on $3 \times 3 \times 10$ cm prisms.

The specimens were subjected to the freezing test after 21 days' hardening in water at a temperature of $+20^\circ$. Freezing was done in a chamber in a stream of cold air at -20° and thawing took place in water at $+20^\circ$. The cycles were as follows : four hours in the morning at -20° ; two hours at $+20^\circ$, four hours at -20° ; fourteen hours at $+20^\circ$. The specimens were kept at $+20^\circ$ each weekend from the Saturday 12 o'clock to the Monday 8 o'clock.

Reference specimens were kept in water at $+20^\circ$.

The compression tests to failure were carried out after a given number of cycles of freezing and thawing on groups of specimens including four that had been subjected to freezing and thawing, and four reference specimens.

The variation in length was measured on prisms, by means of the L'Hermite-Meynier retractometer, once a week, on Saturday afternoons.

2. RELIABILITY OF THE TESTS.

It has been pointed out that it had been impossible to provide all the laboratories with samples of cement from the same manufacturing batch for the first series of tests. This applies to

the clinker activated slag cement D. Table 3 shows that the behaviour of the various samples is absolutely similar. It may be concluded therefore, that the test method used is reliable.

3. OVERALL RESULTS OF THE TESTS.

a) *Comparison of the behaviour of clinker activated slag cement and Portland cement for different values of the C/W ratio.*

Tables 4, 5, 6 and 7 show that the behaviour of slag cement is much less influenced by excess mixing water than that of Portland cement.

From $C/W = 0.75$ onwards, slag cement D behaves satisfactorily at 50 cycles while in the case of the Portland cement samples A, B *ter* and A *ter* the C/W ratio must reach 1.75 or 2.00 before the loss in strength is of the order of 50 % (table no. 4).

The phenomenon persists along similar lines as a function of the number of cycles (tables 5, 6 and 7).

b) *Classification of the cements.*

Tables 8, 9, 10, 11, 12 and 13 give the classification of the cements used for the tests for C/W ratios of 1.5 — 1.75 and 2.00 ; the tables show :

a) that the supersulphated cement F and the quaternary sulpho-pozzolana cement H have the least resistance to the freezing test ;

b) that, irrespective of the C/W value, the high alumina cement J and the soda activated cement G have the best frost resistance ;

c) that, for a C/W ratio equal to 1.5, the clinker activated slag cements C, D, E are superior to the Portland cements A and B but that, as the C/W ratio increases, the results, after becoming more similar at first are finally reversed ;

d) that, for clinker activated slag cements, the influence of the fineness of the grinding is only very small.

c) *Elongations.*

Tables 14, 15 and 16 give the results obtained for Portland cements A and B and the clinker activated slag cement D.

The elongation decreases with increasing C/W ratios, but the elongation corresponding to failure is not a fixed value.

d) *Influence of pozzolana admixtures.*

Table 17 shows the improvement that may be achieved by adding finely ground fly ash to Portland cement. It may be seen that the improvement is the more pronounced when the initial hardening is more extensive, although increasing the hardening time has practically no influence on the resistance to cycles of freezing and thawing.

This is an additional proof of the unfavourable action of hydrated lime, which is gradually being fixed by the pozzolona.

e) *Entrained air.*

Table 18 shows that the addition of an air entraining agent improves the resistance of Portland cement to freezing and thawing but has no influence on the behaviour of slag cements.

f) *Second series of tests.*

Table 19 gives the results of the second series of tests. These results confirm the classification obtained in the course of the first series.

The special Portland cement no. 2 for sea-water structures shows a tendency to better frost resistance than the Portland cement no. 1 with high silica content and the ordinary Portland cement no. 3, for high C/W ratios.

4. CONCLUSIONS.

On the whole, the results obtained at the Aix laboratory fall within the range of the general assumptions outlined earlier on, namely as regards :

- the extremely unfavourable influence of hydrated sulphoaluminate of lime ;
- the unfavourable influence of hydrated lime, particularly at low C/W ratios, as indicated by the fact that an excess of mixing water affects slag cements far less than Portland cements and also by the gradual action of pozzolanas ;
- the difference in behaviour of the entrained air between slag cements and Portland cements.

**RESULTS OBTAINED BY THE LABORATORY OF THE
« OESTERREICHISCHEN ZEMENTFABRIKANTEN »
IN VIENNA (Austria)**

1. TEST METHODS.

The mechanical strength of the various cements was determined according to the standards usually applied in Austria and which are the same as the German standards (DIN 1164).

To investigate the deterioration produced by alternating cycles of freezing and thawing, standard prismatic specimens were made, provided with small measuring stops, according to the standard German tests for the measurement of shrinkage.

The prisms were subjected to the freezing tests after 28 days of hardening in water at + 20°. Freezing was done in a chamber, in a stream of cold air at — 21° and thawing in water at + 20°. The cycles were as follows : four hours at — 21°, one hour at + 20°, four hours at — 21°, fifteen hours at + 20°.

The test programme involved 100 cycles, the expansion being measured every 20 cycles.

2. RESULTS OF THE FIRST SERIES OF TESTS.

Table no. 20 gives an overall survey of the results. It should be pointed out that the mortar for the prisms was made with a C/W ratio of 1.66. The table gives a classification of the cements in order of decreasing resistance to alternating cycles of freezing and thawing. Here again, as in the results of the laboratory of Aix-en-Provence, the supersulphated slag cement and the sulpho-pozzolana cement show the poorest resistance to freezing and thawing.

The high alumina cement has a very satisfactory behaviour.

The slag cements come next ; the poorest is the cement containing lignite ash.

The Portland cements give two opposite results ; cement B, a special cement for sea-water construction is the best of the whole series ; cement A, a cement with high silica content is one of the worst.

As regards the slag cements, fineness seems to have a favourable

influence. Moreover, in spite of a marked expansion, the specimens made with slag cement D and E (medium fine and very fine) are still in very good condition after 100 cycles.

As may be seen, the measurement of variations in length does not seem to permit a reliable classification for cements of very different natures if the tests are not continued till visible signs of destruction appear. This observation agrees with what has been observed at the laboratory at Aix.

Finally, it may be pointed out that the only result that disagrees with those of the Aix laboratory is that for Portland cement B, the special cement for sea-water construction which in this particular series of tests seems to give exceptionnally good results.

3. RESULTS OF THE SECOND SERIES OF TESTS.

Table no. 21 gives a general survey of the results of tests for three different values of the C/W ratio : 1.25, 1.6 and 2.00. Simple visual examination of the appearance of signs of damage, without any attempt at classification of the extent of the elongation for a given number of cycles of freezing and thawing, shows that the supersulphated cement and Portland cements 1 and 3 give the poorest results. The behaviour of the special Portland cement for sea-water construction — no. 2 — is similar to that of the clinker activated slag cement. It may be observed that the elongation measurements for both series of tests give very comparable results as regards slag cement but not for the Portland cements.

4. CONCLUSIONS.

On the whole, the classification obtained on the basis of these tests is very similar to that obtained at Aix : the cements with the poorest resistance are the super-sulphated cement and the quaternary sulpho-pozzolana cement ; the high alumina cement gives very good results.

One particular point stands out, namely that the results of the tests on Portland cement show a much wider dispersion than those of the tests on slag cements. This may be taken as an indication of the influence of the free lime in the anhydrous cement, as outlined in the general assumptions. It may be seen that cements B and no. 2 for sea-water construction, which have a free lime content of only 0.4 % and 0.7 % respectively, behave very well whilst cements A, 1 and 3, which have a free lime content of 1.49 %, 1.05 % and 1.32 % respectively, give rather poor results.

RESULTS OBTAINED BY THE LABORATORY OF THE CEMENT-CCH-BETONG AT LIMHAMN (Sweden)

1. TEST METHODS.

The specimens subjected to freezing and thawing were $100 \times 100 \times 400$ mm concrete prisms with a cement content of 300 kg cement per cubic metre and a C/W ratio of 1.59. The composition of the mix was as follows :

1	part, by weight, of cement,
2.86	» sand 0.5 mm.
1.76	» crushed stone 12 mm.
1.76	» crushed stone 18 mm.

The specimens were cured for 24 hours in a humid atmosphere and were kept in water for a further 27 days. After this they were placed in galvanized containers measuring $105 \times 105 \times 500$ m, filled with water. The containers were placed alternatively in solutions at -15° and at $+15^{\circ}$ for 2 h. 50 ; the time required for moving them from one solution to the next was 10 minutes. The modulus of elasticity was determined each week, the test being stopped when the modulus had dropped to 50 % of its original value.

2. RESULTS (*first series only*).

The tests were made only on cements A, B, C, D, E, F (two Portland cements, slag cement ground to three different finenesses and supersulphated slag cement).

Table no. 22 gives the results of the tests.

The poorest results are those for the supersulphated slag cement F and for Portland cement A which, in its anhydrous phase, has a free lime content of 1.49 %.

Next comes Portland cement B (0.4 % of free lime) which is a special cement for sea-water construction.

Clinker activated slag cements C - D - E gave the best results, the coarsely ground cement C giving the poorest of the three.

3. CONCLUSIONS.

It may be seen that these results agree well with those of Aix and Vienna and fall within the scope of the general assumptions.

**RESULTS OBTAINED BY THE LABORATORY OF THE
« SOCIETE DES CHAUX ET CIMENTS DE LAFARGE
ET DU TEIL » (France)**

1. FIRST SERIES OF TESTS.

The tests were carried out on a clinker activated slag cement *D bis*, a supersulphated slag cement *F bis*, a slag cement with a lignite ash basis *I bis*, two Portland cements A and B and one quaternary sulphopozzolana cement *H bis*.

The tests were carried out on 14 × 14 × 56 cm prisms of concrete made with Seine aggregate, with a cement content of 300 kg of cement per cubic metre and with a C/W ratio of 1.5.

After 7 days hardening in water at + 18°, the specimens were placed in galvanized containers filled with water. The containers were placed alternatively in solutions at — 20° for 6 hours and at + 20° for 18 hours.

After 25 cycles of freezing and thawing, the specimens were tested in bending and in compressions and the strengths compared to those of reference specimens kept in water at + 18° from the beginning of the experiment. The results were as follows :

<i>D bis</i> — Clinker activated slag cement	106 %
<i>I bis</i> — Slag cement with fly ash	79 %
<i>F bis</i> — Supersulphated slag cement	68 %
B — Portland cement for sea-water	43 %
A — Portland cement	50 %
<i>H bis</i> — Quaternary sulpho-pozzolana cement	0 %

The tests were repeated for two different compositions of the quaternary sulpho-pozzolana cement, the hardening time being increased from 7 to 28 days, and for two values of the C/W ratio : 1.5 and 1.8. In each case the specimens disintegrated completely after 25 cycles.

2. SECOND SERIES OF TESTS.

The tests were carried out on cements no. 1 (with high silica content), no. 2 (sea-water), no. 3 (ordinary Portland), no. 4 (super-sulphated), no. 5 (clinker activated slag cement with 1 % CaCl²).

Table no. 23 gives the result of the mechanical strength tests and of chemical analysis.

The tests were carried out on $7 \times 7 \times 28$ cm concrete prisms made with a 0.2 mm Seine sand and 2-15 mm Seine gravel and with different C/W ratios : 1.25, 1.6 and 2.00. In order to ensure adequate workability of the concrete for all the values of the C/W ratio, the proportions of the mix were as follows :

C/W = 1.25 Mix proportions 200/600/600,
 C/W = 1.60 » » 300/400/800,
 C/W = 2.00 » » 400/400/800.

The concrete was placed in the moulds by vibration on the Sinex vibrating table, with a frequency of 3.000 hertz and an amplitude of 0.38 mm, for one and a half minutes. Two prisms were vibrated at the same time.

After curing for 24 hours in a humid cupboard under a sheet of polyvinyl chloride, the specimens were taken from the moulds and kept in water at 18-20° for 28 days.

Two prisms were left in the water to serve as reference specimens and two were subjected to 25 cycles of freezing in water at - 25° and thawing in water at + 25° at a rate of a cycle a day.

After 25 cycles, the drop in compressive strength of the specimens subjected to freezing and thawing was determined in relation to the mean strengths of four halves of the reference prisms. The percentage drop in strength P was as follows :

Nature of the cement	C/W = 1.25		C/W = 1.60		C/W = 2.00	
	En-train ed air %	P %	En-train ed air %	P %	En-train ed air %	P %
Portland cement n° 1 (high silica content)....	5.0	77	2.3	57.5	1.9	63
Portland cement n° 2 (sea-water)	5.7	61	2.3	45	2.2	35.3
Portland n° 3	5.3	77	2.7	56	2.5	37
Supersulphated cement n° 4	4.4	73	1.9	54.5	2.0	35.8
Slag cement n° 5	4.8	51.5	2.3	42	2.2	57.5

3. ANALYSIS OF RESULTS AND CONCLUSIONS.

In both series of tests the clinker activated slag cement gave the best results.

In the first series, the sea-water Portland cement gives slightly

lower results than the other Portland cement ; in the second series, it behaves better than the other Portland cements, slightly less well than the slag cement low C/W ratios and equally well as the slag cement for high C/W ratios.

These anomalies seem to confirm the dispersion of results that is a feature of the tests made with Portland cements.

It may be observed, moreover, that, in the first series, the slag cement continued to harden in spite of the freezing and thawing, whilst, in the second series, it suffered extensive weathering.

The difference in behaviour might be due to the fact that the freezing temperatures were not the same in both cases : — 20° and — 25°.

However, M. Lhopitallier thinks that the superiority of slag cement over Portland cement when the specimens are subjected to freezing and thawing at early ages decreases when the initial curing period is increased. The difference between the two series of tests would then be due to the fact that, in the first series, the initial curing period was seven days and that it was 28 days in the second series. Tests carried out by M. Lhopitallier have shown that the longer the initial curing time the more the behaviour of slag cements is affected and that the results of comparison with Portland cement are reversed when the duration of the initial curing time reaches a certain time. In our opinion this constitutes a very important point for further research.

Finally, the supersulphated cement gave results that differ considerably from those obtained in the two other laboratories. The behaviour of this cement was fairly satisfactory in the first series of tests. In the second series of tests, its behaviour is comparable to that of Portland cement 2 for sea-water construction and to that of the slag cement for high C/W values.

**RESULTS OBTAINED BY THE LABORATORY OF THE
« REGION D'EQUIPEMENT HYDRAULIQUE ALPES II »
OF THE «ELECTRICITE DE FRANCE» AT ALBERTVILLE (France)**

This particular laboratory participated only in the second series of tests. The tests were carried out for two values of the C/W ratio : 1.25 and 1.60.

1. TEST METHODS.

The tests were carried out on $14 \times 14 \times 56$ cm concrete prisms. The concrete was made with gneiss aggregate with a Faury grading 0 - 40 mm and with a cement content of 250 kg per cubic metre.

After curing for 21 days at $+ 20^\circ$ in a saturated atmosphere, the specimens were subjected to the freezing tests in a chamber in a stream of cold air at $- 20^\circ$, the thawing took place in water at $+ 20^\circ$.

The cycles included 12 hours at $- 20^\circ$ and 12 hours at $+ 20^\circ$.

Deterioration of the specimens was measured by measuring the rate of propagation of a wave, the measurements being made each week.

2. RESULTS.

Table 24 shows the results.

The clinker activated slag cement shows only little damage, irrespective of the C/W ratio. The poorest results were those for the supersulphated slag cement and Portland cement no. 1 with high silica content.

Portland cements no. 2 (sea-water) and 3 (ordinary) behave in a similar manner to Portland cement no. 1 for $C/W = 1.25$ but have a much better behaviour when the C/W ratio is 1.5 ; all the same, they gave less satisfactory results than slag cement.

These results agree with those of the previous laboratories with the exception of those for Portland cement no. 3 the behaviour of which is better than that of Portland cement no. 1 this time. Here again the difference may be attributed to the dispersion of results experienced with all the tests on Portland cements.

**RESULTS OBTAINED BY THE LABORATORY OF THE
« CENTRE D'ETUDES ET DE RECHERCHES DES LIANTS
HYDRAULIQUES » IN PARIS (France)**

1. FIRST SERIES OF TESTS.

The ten samples of cement received by the laboratory were subjected to the following determinations : specific weight, specific surface, amount of mixing water required for the pure paste in order to achieve normal consistency and setting time. The results are shown in table 25.

For each sample of cement, 12 prisms measuring $4 \times 4 \times 16$ cm were made with the standard CEM - Bureau RILEM mortar with $C/W = 2$. Mixing was done mechanically with the Bouvard mixer - one minute in the dry state and another four minutes after addition of the mixing water containing either CaCl^2 or NaOH . The flow was measured on the German "shock" table (table no. 25). Placing was done with the Couillaud gyrator (5 minutes) and the specimens were cured in a humid atmosphere for 24 hours.

Length, weight and dynamic modulus of elasticity were determined on each specimen (according to the specific frequency of the specimens), after which they were placed in water up to the age 28 days.

At the age of 28 days, the length, weight and modulus of elasticity were measured again and three specimens were broken in bending and compression. The nine remaining specimens were placed in a refrigerated cupboard set at a temperature of -19° where they remained for 15 hours, after which they were placed in water at $19-20^\circ$ for the rest of the day and also on Saturdays and Sundays.

Non-destructive tests were carried out every ten cycles on three specimens for each cement intended for the longest period of curing.

Whenever one of the cements showed marked signs of weakening, two remaining specimens were measured and then broken in bending and compression. The same tests were carried out on two specimens of each cement every fifty cycles till no specimens remained and irrespective of their condition.

a) *Variation in weight.*

The determination of the variation in weight gives no useful information about the extent of the weathering since the specimen starts flaking at the same time as it swells and fills up with water and the sum of these variations loses all significance.

b) *Mechanical strengths.*

The tensile strength is affected much more rapidly by freezing than the compressive strength ; it gives interesting results. For cements reputed to be frost resistant in the expansion test, there is an increase in strength at fifty cycles. The compressive strength is affected to any appreciable extent only for those cements showing the greatest expansion.

c) *Expansion.*

Very considerable expansion occurred with the cements with the poorer behaviour.

The laboratory of Albertville thinks that the measurement of expansion has the greatest number of advantages : it is non-destructive and can be carried out on specimens that have weathered quite considerably, where the determination of the modulus of elasticity in terms of specific frequency becomes impossible when the specimens are cracked.

d) *Modulus of elasticity.*

Once they are cracked, the specimens rapidly lose their capacity of vibrating in resonance.

e) *Appearance.*

Visual examination confirms the results of the numerical determinations.

The results of the various determinations are given in tables 26, 27, 28 and 29.

The supersulphated cement F and the sulpho-pozzolana cement H gave the poorest results.

Portland cements A and B and high alumina cement J gave the best results.

The soda activated cement G and the three slag cements C, D, E, which, incidentally, are not classified in order of increasing fineness give intermediate results.

In view of the high C/W ratio the results are not contradictory to those obtained by the previous laboratories.

The very great difference between the expansion of Portland cements and slag cements should be pointed out, the expansion of the slag cements is not accompanied by an abnormal decrease in strength. The same phenomenon has been observed by the Vienna laboratory.

2. SECOND SERIES OF TESTS.

As regards the second series of tests, the laboratory carried out mechanical compressive strength tests only.

Table 30 shows the results.

The cements giving the poorest results are Portland cement no. 1 with high silica content and supersulphated slag cement no. 4. The best results are those for Portland cement no. 2 (sea-water) and clinker activated slag cement no. 5.

Comparing these results with the classification established by the laboratory at Aix-en-Provence, there seems to be a complete reversal between Portland cement no. 2 and clinker activated slag cement no. 5. Apart from this, the classifications follow similar lines.

**RESULTS OBTAINED AT THE SOTTOCASTELLO LABORATORY
OF THE S.A.D.E. AND THE SONDRIO LABORATORY
OF THE FALCK (Italy)**

1. TEST METHODS.

For each type of cement six $20 \times 20 \times 60$ cm prisms were made of concrete manufactured with natural aggregate from the Piave river, the grading conforming to the Faury curve ($A = 27$ D max. 40 mm) and with a cement content of 250 kg per cubic metre. The amount of mixing water was determined in such a way that all the samples should have the same workability. The C/W ratio was more than 2.00 for all the tests.

The specimens were cured for 54 days in a saturated atmosphere in a room at a temperature of 20° and for two more days in water at 20° . Three prisms were subjected to freezing and thawing, the other three remaining in water to serve as reference specimens.

The cycles of freezing and thawing were as follows: four hours at $+20^\circ$; eight hours at -20° ; 12 hours at $+20^\circ$; four hours at -20° .

Determination of the modulus of elasticity, in terms of the longitudinal vibration frequency of the specimen took place after 25, 50, 75 and 100 cycles. After 100 cycles, the specimens were broken in bending and the compressive strength was determined on 20 cm cubes originating from the bending tests.

In this way, four cubes that had been subjected to freezing and thawing and four reference cubes were tested in compression and two others were subjected to the permeability test at the same time as two reference cycles.

2. RESULTS OF THE FIRST SERIES OF TESTS.

The ten samples of cement were used for the manufacture of mortar specimens according to the standard Italian acceptance tests; the results are shown in table 31.

Table 32 gives the results of the freezing and thawing tests.

The following table shows the classification according to modulus of elasticity, tensile strength and compressive strength. The percentages quoted in the table represent the ratio of the values obtained for specimens that had undergone the freezing tests to those obtained for the reference specimens.

The cements were as follows :

- A and B = Portland cements,
- C, D and E = Slag cements of different fineness,
- F = Supersulphated cement,
- G = Soda activated slag cement,
- H = Sulpho-pozzolana cement,
- I = Slag cement with lignite ash,
- J = High alumina cement.

Dynamic modulus										
	F	B	G	A	J	E	C	D	I	H
%	95.4	94.8	92.9	92	89.9	86.5	85.1	80.8	46.7	22.7

Tensile strength										
	F	B	G	C	A	E	J	D	H	I
%	116	102	85.4	80.2	79.6	79.6	72	71.5	55.6	48.2

Compressive strength										
	J	G	F	B	E	A	C	I	D	H
%	98.5	96.7	96.5	94	92.8	91.5	88	83.3	79.2	67.2

As may be seen, the three classifications are not very different and, with the exception of cements I and H, the percentage losses are low, which does not allow for a very characteristic order of classification. This may be due to the high value of the C/W ratio.

The main difference from the previous results is the very good behaviour of the supersulphated cement.

3. RESULTS OF THE SECOND SERIES OF TESTS.

The tests were carried out for only two values of the C/W ratio : 1.25 and 2.00 and evaluation of the results has been done only by measuring the dynamic modulus of elasticity.

The results are shown in table 33.

For C/W = 2, the five cements gave very similar values, with very little weathering.

For C/W = 1.25, weathering was again slight, with the exception of the supersulphated slag cement and the clinker activated slag cement.

With the exception of the result for the supersulphated slag cement, these results do not agree with those of the previous laboratories.

**RESULTS OBTAINED BY THE LABORATORY OF THE
JAPAN CEMENT ENGINEERING ASSOCIATION
AT TOKYO (Japan)**

1. FIRST SERIES OF TESTS.

Tables 34, 35, 36, 37, 38 and 39 give the characteristics of the cements and concretes used in the tests.

The cement tests were made on 1/3 mortar with a C/W ratio of 2.00, using the natural siliceous sand of the Soma district (more than 93 % of silica) graded as follow :

from 0.008 mm to 0.15 mm	5 %
from 0.15 mm to 0.5 mm	25 %
from 0.5 mm to 1.2 mm	57 %
from 1.2 mm to 1.7 mm	10 %
more than 1.7 mm	3 %

Preparation of the mortar took place at a temperature of 20 ± 0.5 degrees and 85 % relative humidity. Curing was done at 20 ± 0.2 degrees. Three $4 \times 4 \times 16$ cm prisms were made for each cement.

Cylindrical specimens (10×20 cm) were used for the tests on concrete.

The concrete specimens for the freezing and thawing tests were $10 \times 7.5 \times 40$ cm prisms. Three specimens were made for each cement. Mixing in the concrete mixer lasted for three minutes after addition of the mixing water. The specimens were cured for 24 hours in a humid room and then in potable water at 20° after they had been taken from the moulds.

No information was provided about the method used for the freezing and thawing tests between 0 or 5° and -18° .

Table 40 gives the weight W of the specimens, the elastic modulus E and the remaining percentage P_c of this modulus after N cycles of freezing and thawing.

The investigators think that, in spite of the fact that the number of tests involved was too small to allow for the formulation of general rules, the following conclusions may be drawn :

1) *Classification of the frost resistance of the various cements according to the value of the modulus of elasticity shows better*

values for the slag cements (C D E) than for the other cements (F H I), the worst results being obtained for the sulpho-pozzolana cement (H).

2) Portland cement (B) with low lime content gave much better results than Portland cement (A) with high lime content.

On the whole, Portland cement with low lime content and slag cement seems to give better strengths than cement with a high lime content ; consequently, the frost-resistance might be characterised to a certain extent by the amount of lime.

Results obtained by the Japanese laboratory give a classification that agrees on the whole with that of the "Centre d'Etudes et de Recherches des Liants Hydrauliques" (France) ; both these laboratories used a C/W ratio = about 2 for their tests.

The only difference in the results concerns Portland cement A which is here classified as very poor.

2. SECOND SERIES OF TESTS.

Tables 41, 42, 43, 44 and 45 give the characteristics of the cements and concretes used for the tests.

The tests for cements have been made on $4 \times 4 \times 16$ cm specimens of 1/3 mortar made with a natural quartz with rounded grains (96 % silica) and with a C/W ratio = 2.00 ; the grading was as follows :

from 0.105 mm to 0.294 mm	1 part
from 0.294 mm to 0.590 mm	2 parts
from 0.590 mm to 1.190 mm	7 parts

The freezing tests were carried out on $10 \times 7.5 \times 40$ cm concrete prisms cured in a humid atmosphere for 24 hours and then in potable water at 20° for 20 days. No information is provided about the method used for the freezing tests between 0 or 5° and -17° .

Table 46 gives weight W modulus of elasticity E and the remaining percentages W_R and P_C of these two values after N cycles of freezing and thawing.

The investigators have made the following remarks :

In these particular tests, the frost resistance results differ considerably from those of the first series.

Correlation with the lime content of the Portland cement was not as good as expected. It must be noted that the difference in the extent of the deterioration is due to poor curing of the test

cements, particularly in the case of a higher W/C ratio, i.e. to the fact that the specimens were tested at the age of 21 days and had not sufficiently hardened to give a better durability when compared with that of specimens tested at a later age.

Whatever the reasons may be, the tests on prisms have given the following results under the test-conditions :

1) Considered in terms of lime content, Portland cement no. 1 with high lime content gives the lowest strength, irrespective of the W/C ratio used. Portland cement no. 2, with a particularly low lime content, seems to give better results than no. 1, while no. 3 with a moderate lime content gives comparatively good results in spite of the presence of greater amounts of free lime.

2) The concretes made with the various cements show neither very marked differences in frost resistance nor a marked difference in the weight losses.

3) Greater differences in fineness of all the types of cement seems to have no correlation with frost resistance.

4) It may be concluded that no decision can be made till all necessary tests have been made at the various stages of hardening of the concrete and more particularly for the higher W/C ratios. (Tests should be started when the specimens have reached the age of at least 21 days, 35 days...). The relation between tests carried out in laboratory conditions and those carried out on the site should be taken into account.

It need hardly be stressed, moreover, that the quality of a cement cannot be determined by simple chemical analysis. There are a number of problems such as lack of control during the burning and clinkerization stages, that affect the quality of cement and the durability of concrete. From this point of view it would seem necessary to study at the same time the mineralogical structure of the clinker from which the cement is manufactured.

When one compares the results of the second series of tests with those of the first, one is impressed by the fact that, whatever the nature of the cement and the value of the C/W ratio, a few cycles of freezing and thawing have been sufficient to destroy the specimens where, in the first series, several dozens of cycles were needed to produce any appreciable damage.

The Japanese investigators put forward the assumption that the initial hardening time of 21 days was not sufficient ; they do not give the initial hardening time for the specimens in the first series. This assumption does not agree with the results obtained by the other laboratories.

The cements used for the second series of tests seemed to have retained their quality in spite of the distance they had to travel, since the mechanical strengths of the specimens are similar to those of the first series.

CONCLUSIONS

On the whole, there is an unmistakable family likeness between these various test reports. There are, of course, just a few discordant notes that have been pointed out at the time and would require a more extensive investigation. However, in view of the great diversity of the test methods and the complexity of the problem, it was hardly to be expected that the results would be the same everywhere.

It should be remembered, moreover, that all the measurements that can be made on concrete involve a certain and quite appreciable amount of dispersion and that the dispersion is particularly great in the case of frost - resistance tests.

All the same, the general impression is that, on the whole, the assumptions about the mechanism of disintegration put forward at the beginning of the present report, provide an explanation for the majority of the results obtained :

- Unfavourable influence of calcium sulpho-aluminate ;
- Influence of the free lime in anhydrous Portland cement — the small variations in the total amount and in the distribution might be the reason for the dispersion of the results ;
- Influence of the hydrated lime in the hydrated phase ;
- Difficulty of classifying the cements when the C/W ratio is very high.

The authors of the present note wish first of all to thank most sincerely all those who accepted to take part in this joint investigation and, in so doing, have demonstrated how useful such friendly cooperation can be.

They are of the opinion that the best way to continue along these lines is to use the results obtained during this first stage of

the work as a basis for the formulation of general assumptions concerning textures and the mechanism of transformation of these textures and to subject them to critical tests which each would be free to organise as he wishes.

It is in this frame of mind that they present the general assumptions formulated by M. Chappelle and developed at the beginning of the report to the critical appraisal of those concerned, in the hope that many of them will be able to provide further experimental data to help confirm or disprove these assumptions.

ANNEXE
TABLEAUX

APPENDIX
TABLES

TABLEAU N° 1 a)
 CARACTERISTIQUES DES CIMENTS EXPEDIES AUX DIFFERENTS LABORATOIRES
 CHARACTERISTICS OF THE CEMENTS SENT TO THE VARIOUS LABORATORIES

PREMIERE SERIE D'ESSAIS FIRST SERIES OF TESTS

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
Refus au tamis	0,009	0,26	0,24	0,13	0,09	0,03	0,16	—	—	0,03	Residue on sieve
324 mailles	0,04	0,27	0,11	0,05	0,08	0,03	0,06	—	—	0,06	900 »
900 »	2,59	6,41	0,38	0,19	0,20	0,19	0,21	0,07	0,25	2,53	4.900 »
4.900 »	13,29	22,62	10,52	7,62	7,29	6,80	10,16	3,93	8,96	19,81	16.000 »
16.000 »	60,12	52,14	64,82	70,42	73,68	74,20	68,60	79,58	68,18	51,81	Flourometer reading 30 μ
Floumètrie 30 μ	3.245	3242	3071	3038	3055	3113	3097	2724	2953	3414	Specific weight
Poids spécifique	3741	3696	3588	4103	4532	5396	4224	5917	4210	3988	Specific surface
Surface spécifique	192	187	162	188	207	90	233	115	78	515	Compressive strength
Résistance à la compression	326	315	319	316	372	376	310	320	188	537	2 days
2 j	480	425	408	383	440	602	345	378	307	650	7 »
7 j	573	456	472	500	510	782	436	496	455	724	28 »
28 j	628	543	547	583	571	900	517	574	506	863	90 »
90 j											1 year
1 an											

A = Ciment Portland 250/315 contenant 1,49 % de CaO libre
 B = Ciment Portland 250/315 contenant 0,4 % de CaO libre
 C = Ciment de laitier binaire (70 % de laitier - 30 % de Portland)

D = id
 E = id
 F = Ciment de laitier sursulfaté
 G = Ciment de laitier catalysé à la soude
 H = Ciment sulfopozzolanique quaternaire
 I = Ciment de laitier à base de cendre de lignite
 J = Ciment aluminé

Nota. — Les déterminations ci-dessus ont été faites par le laboratoire d'Aix-en-Provence. Les essais mécaniques en mortier 1/3 ont été effectués suivant les normes françaises, avec un rapport C/E constant et égal à 2,31, à l'exception du ciment aluminé pour lequel C/E = 2,52.

A = Portland Cement 250/315 free CaO content 1,49 %
 B = Portland Cement 250/315 free CaO content 0,4 %
 C = Binary slag cement (70 % slag - 30 % Portland)

D = ditto
 E = ditto
 F = Supersulphated slag cement
 G = Soda activated slag cement
 H = Quaternary sulpho-pozzolana cement
 I = Slag cement with a lignite ash base
 J = High alumina cement

NOTE. — The above measurements have been made by the laboratory at Aix-en-Provence. Mechanical tests on 1/3 mortar were carried out according to the French standard specifications, with constant C/W ratio of 2.31 with the exception of the high alumina cement for which the C/W ratio was 2.52.

Coarse grinding
 Medium »
 Fine »

TABLEAU N° 1 b) TABLE 1 b)
CARACTERISTIQUES DES CEMENTS (suite) - Mêmes désignations que sur le tableau 1 a)
CHARACTERISTICS OF THE CEMENTS (continuation) - Same notations as for table 1 a)

	D bis	F bis	H bis	H 1 bis	H 2 bis	I bis	
Refus au tamis	324 mailles 900 » 4.900 » 16.000 »	0,22 0,03 0,13 6,52	— — 0,10 4,31	1,89 94,68	1,87 93,14	0,13 0,03 0,06 3,29	Residue on sieve 324 mesh 900 » 4.900 » 16.000 »
Flourométrie 30 μ	72,50	77,36	76,58	94,68	93,14	77,90	Flourometer reading 30 μ
Poids spécifique	3,070	—	—	2,724	2,750	2,953	Specific weight
Surface spécifique	4,304	—	—	6,669	6,336	6,102	Specific surface
Densité apparente				0,867	0,861		Apparent density
Début prise				4 h 15	4 h 15		Start of setting
Fin prise				15 h 30	14 h		End of setting
Gonflement à chaud mm				4,5	3,5		Swelling on heating
Résistance à la compression	2 j 7 j 28 j 90 j 1 an	110 367 645 791 830	113 353 432 482 600	188 370 529 646 693	103 301 450 523 560	153 298 410 484 550	Compressive strength 2 days 7 » 28 » 90 » 1 year
Résistance à la traction	2 j 7 j 28 j 90 j 1 an			20,3 34,8 43,3 48,8 52,4	9,5 26,5 34,8 41,2 51,0		Tensile strength 2 days 7 » 28 » 90 » 1 year

Nota : Le ciment H. 1 bis est un ciment à haute résistance initiale. Note : Cement H. 1 bis is a cement with high initial strength.

TABLEAU N° 1 c)

TABLE 1 c)

CHARACTERISTIQUES DES CIMENTS (suite) - Mêmes désignations que sur le tableau 1 a)
 CHARACTERISTICS OF THE CEMENTS (continuation) - Same notations as for table 1 a)

	A ter	B ter	C ter	D ter	E ter	F ter	G ter	H ter	I ter	J ter	
Refus au tamis	0,03 0,04 2,58 13,91	0,16 0,40 5,20 19,18	0,20 0,02 0,52 1,33	0,05 0,05 0,39 9,18	0,03 0,03 0,35 6,81	0,02 0,01 0,22 6,27	0,05 0,04 0,43 5,53	0,02 0,01 0,08 6,04	— — 0,16 6,46	— — 1,20 12,75	Residue on sieve
Flourométrie 30 μ	56,20	53,40	63,61	67,32	73,86	74,36	74,92	75,98	68,80	61,88	Flourometer reading 30 μ
Poids spécifique	3,286	3,271	3,070	3,111	3,167	3,056	3,009	2,637	2,983	3,398	Specific weight
Surface spécifique	4,005	3,800	3,696	4,519	5,184	5,510	4,431	5,712	5,084	3,975	Specific surface
Densité apparente	1,158	1,073	0,982	0,884	0,836	0,871	0,897	0,728	0,884	1,000	Apparent density
Début prise	1 h 45	4 h 45	3 h 45	4 h 45	4 h 15	4 h 30	0 h 25	7 h 30	1 h 50	3 h 40	Start of setting
Fin prise	6 h 45	9 h	9 h 15	9 h 15	8 h 45	entre 10 h et 21 h	2 h 45	15 h 30	7 h 50	8 h 40	End of setting
Gonfl. à chaud	2	0,25	0	0,5	0	0,5	0	0	voir nota	0	Swelling on heating
Résistance à la compression	222 415 520 670 714	212 330 419 569 526	152 313 423 454 535	181 352 505 552 620	199 382 540 586 631	177 495 613 684 746	177 255 317 380 432	92 297 440 523 568	148 250 309 513 593	690 720 714 749 812	Compressive strength
Résistance à la traction	26,2 33,3 40,0 43,8 47,4	24,2 32,7 39,7 43,2 47,7	13,7 28,3 41,0 38,3 44,5	20 35,7 44,0 40,5 45,0	20,2 33,7 41,3 38,6 45,5	22,3 40,6 47,6 49,9 50,9	29,6 32,8 36,0 30,0 32,4	12,9 25,9 41,15 44,00 56,85	18 30,2 39,5 43,9 46,6	37,3 43,3 35,2 42,8 52,5	Tensile strength

Nota : En ce qui concerne le ciment I ter, la mise à l'eau immédiate donne un gonflement de 36,5 mm (24 heures dans l'eau) et de durcissement en salle humide donne un gonflement de 2 mm et 3 mm (3 heures à l'ébullition).

Note : As regards cement I ter, immersion in water immediately produces a swelling of 36.5 mm (24 hours in water) and 39.5 mm (3 hours boiling). Immersion after 24 hours hardening in humid room produces a swelling of 2 mm and 3 mm (3 hours boiling).

TABLEAU N° 2
 CARACTERISTIQUES DES CIMENTS EXPEDIES AUX DIFFERENTS LABORATOIRES
 CHARACTERISTICS OF THE CEMENT SENT TO THE VARIOUS LABORATORIES
 DEUXIEME SERIE D'ESSAIS
 SECOND SERIES OF TESTS

Nature du ciment	Portland 250/315 à hte teneur en silice	Portland 250/315 « prise mer »	Portland 250/315 ordinaire	Ciment de laitier sursulfaté	Ciment de laitier au clinker	Nature of the cement
	Portland 250/315 with high silica content 1	Portland 250/315 « sea-water » 2	Portland 250/315 ordinary 3	Supersulphated slag cement 4	Clinker activated slag cement 5	
% CaO libre	1,05	0,70	1,32	/	/	% of free CaO
Densité apparente	1,061	989	1,080	886	943	Apparent density
Poids spécifique	3,125	3,110	3,155	2,941	3,023	Specific weight
Surface spécifique cm ² /gr	3,548	4,005	2,728	4,263	3,514	Specific surface cm ² /gr
Flourométrie 30 μ	55,46	57,72	43,42	70,32	64,80	Flourometer reading 30 μ
Finesse 0,36 mm	0,13	0,12	0,08	0,05	0,08	Fineness 0,36 mm
(Refus 0,18 mm	0,24	0,30	0,51	0,14	0,34	Residue 0,18 mm
au 0,09 mm	8,03	5,46	10,60	1,17	1,43	on 0,09 mm
tamis) 0,048 mm	19,98	16,62	23,82	13,87	13,72	sieve 0,048 mm
% Eau en pâte pure	28,37	23,00	35,01	14,63	15,56	% water in pure paste
Prise / Début	22	25,6	25	25,6	25,4	Setting / Start
/ Fin	50	3 h 20	3 h 30	4 h 25	4 h 15	/ End
Gonflement après ébullition	9 h 30	8 h 40	8 h	8 h	9 h	Swelling after boiling
C/E du Mortier	1	1,25	0	1	0,5	C/W ratio of the mortar
Résistance 2 j	2,42	2,35	2,38	2,4	2,4	2 days
à 7 j	271	200	178	205	174	7 »
la 28 j	403	361	289	425	315	28 »
à 90 j	530	488	410	597	445	90 »
compression	679	565	425	595	523	Compressive strength

ESSAIS EFFECTUES AU LABORATOIRE
d'AIX-en-PROVENCE

TESTS CARRIED OUT IN THE LABORATORY
of AIX-en-PROVENCE

TABLEAU N° 3

COMPARAISON DES RESULTATS OBTENUS AVEC LES DIFFERENTS ENVOIS DE CIMENT DE LAITIER AU CLINKER BROYE A UNE FINESSE DE MOUTURE MOYENNE (D)
(Addition de 1 % de CaCl₂)

TABLE 3

COMPARISON OF THE RESULTS OBTAINED WITH THE VARIOUS SAMPLES OF CLINKER ACTIVATED SLAG CEMENT GROUND TO MEDIUM FINENESS (D)
(Addition of 1 % CaCl₂)

C — E — C — W	Référéncce de l'échantillon Reference of sample	Pourcentages de chute de résistances mécaniques à la compression à Percentage loss of mechanical compressive strength at				
		10 cycles	25 c.	50 c.	100 c.	150 c.
1,5	D	31,8	41	53	76	100
	D bis	25	35	47	78	86
	D ter	26,6	36,5	47,4	71	100
1,75	D	35,7	45	56,3	71	100
	D bis	22	44	56	75	94
	D ter	33	49	54	85	100

TABLEAU N° 4

INFLUENCE DU RAPPORT C/E SUR LA RESISTANCE AUX CYCLES DE GEL ET DEGEL A 50 CYCLES EN FONCTION DE LA NATURE DU CIMENT

TABLE 4

INFLUENCE OF THE C/W RATIO ON THE RESISTANCE TO CYCLES OF FREEZING AND THAWING, DETERMINED AT 50 CYCLES, AS A FUNCTION OF THE NATURE OF THE CEMENT

C — E — C — W	Pourcentages de chute de résistances mécaniques à 50 c. Percentage loss of mechanical strength at 50 cycles			
	Ciment de laitier au clinker (30 % de Portland) Clinker activated slag cement (30 % of Portland)	Portland 230/315 contenant 1.49% de CaO libre Portland 250/315 with free CaO content of 1.49 %	Portland 230/315 pour travaux maritimes contenant 0.09% de CaO libre Sea water Portland with free CaO content of 0.09 %	Portland 230/315 contenant 1.05% de CaO libre Portland 230/315 with free CaO content of 1.05 %
0,5	100	100	100	100
0,75	39	100	100	100
1,00	46	100	100	91
1,25	45	100	100	
1,50	50	77,8	100	64
1,75	54	79	67,4	40
2,00	50	55,8	42,6	31
2,25	18,5	28,5		16
2,50	18			25
2,75	2,9			22
3,00	4,6			20

TABLEAU N° 5
 CHUTES DE RESISTANCES MECANQUES RESULTANT DE L'ALTERNANCE DES CYCLES DE GEL
 ET DEGEL POUR DIFFERENTES VALEURS DU RAPPORT C/E
 MECHANICAL STRENGTH LOSSES DUE TO ALTERNATING CYCLES OF FREEZING AND THAWING
 FOR VARIOUS VALUES OF THE C/W RATIO

PORTLAND B TER 250/315 POUR TRAVAUX MARITIMES PORTLAND CEMENT B TER 250/315 FOR SEA-WATER
 TITRANT 0,09 % DE CaO LIBRE CONSTRUCTION, WITH FREE CaO CONTENT OF 0,09 %

C	Nombre de cycles de gel et dégel Number of cycles of freezing and thawing											
	10 cycles		25 cycles		50 cycles		100 cycles		150 cycles		200 cycles	
	Témoins Reference Specimens k/cm ²	Gelées Frozen Specimens k/cm ²	Témoins Reference Specimens k/cm ²	Gelées Frozen Specimens k/cm ²	Témoins Reference Specimens k/cm ²	Gelées Frozen Specimens k/cm ²	Témoins Reference Specimens k/cm ²	Gelées Frozen Specimens k/cm ²	Témoins Reference Specimens k/cm ²	Gelées Frozen Specimens k/cm ²	Témoins Reference Specimens k/cm ²	Gelées Frozen Specimens k/cm ²
0,5	47	0	55	0	70	0						
0,75	110	57	125	0	139	0						
1,00	191	118	208	0	230	0	272					
1,25	296	176	303	140	341	0	366					
1,50			411	184	455	0	491	379	0	401	0	
1,75			514	286	510	166	557	502	0	527	0	
2,00			603	494	664	381	697	612	282	640	0	
								713		721	260	

TABLE 6

TABLEAU N° 6

CHUTES DE RESISTANCES MECANIKES RESULTANT DE L'ALTERNANCE DES CYCLES DE GEL ET DEGEL POUR DIFFERENTES VALEURS DU RAPPORT C/E
 MECHANICAL STRENGTH LOSSES DUE TO ALTERNATING CYCLES OF FREEZING AND THAWING FOR VARIOUS VALUES OF THE C/W RATIO

PORTLAND A 250/315 TITRANT 1,49 % DE CaO LIBRE PORTLAND CEMENT A 250/315 WITH FREE LIME CONTENT OF 1,49 %

C — F C — W	Nombre de cycles de gel et dégel Number of cycles of freezing and thawing											
	10 cycles		25 cycles		37 cycles		50 cycles		100 cycles		150 cycles	
	Témoin Reference Specimens k/cm ²	Gelées Frozen Specimens k/cm ²	Témoin Reference Specimens k/cm ²	Gelées Frozen Specimens k/cm ²	Témoin Reference Specimens k/cm ²	Gelées Frozen Specimens k/cm ²	Témoin Reference Specimens k/cm ²	Gelées Frozen Specimens k/cm ²	Témoin Reference Specimens k/cm ²	Gelées Frozen Specimens k/cm ²	Témoin Reference Specimens k/cm ²	Gelées Frozen Specimens k/cm ²
0,5	57	0	61	0	74	0	74	0	74	0	74	0
0,75	125	0	130	0	146	0	146	0	146	0	146	0
1,00	196	106	206	0	219	0	219	0	219	0	219	0
1,25	284	216	306	173	326	0	326	0	326	0	326	0
1,50	380	280	395	206	419	93	419	93	419	93	419	93
1,75			526	291	510	107	510	107	510	107	510	107
2,00			563	363	634	280	634	280	634	280	634	280
2,25					843	603	843	603	843	603	843	603
					798	665	798	665	798	665	798	665
					471	471	471	471	471	471	471	471
					595	595	595	595	595	595	595	595
					670	670	670	670	670	670	670	670
					877	877	877	877	877	877	877	877
					483	483	483	483	483	483	483	483
					0	0	0	0	0	0	0	0
					0	0	0	0	0	0	0	0
					0	0	0	0	0	0	0	0
					475	475	475	475	475	475	475	475

TABLEAU N° 7
 TABLE 7
 CHUTES DE RESISTANCES MECANQUES RESULTANT DE L'ALTERNANCE DES CYCLES DE GEL
 ET DEGEL POUR DIFFERENTES VALEURS DU RAPPORT C/E
 MECHANICAL STRENGTH LOSSES DUE TO ALTERNATING CYCLES OF FREEZING AND THAWING
 FOR VARIOUS VALUES OF THE C/W RATIO

CIMENT DE LAITIER AN CLINKER D TER CLINKER ACTIVATED SLAG CEMENT D TER
 (morture moyenne sans CaCl²) (medium fineness, without CaCl²)

C	Nombre de cycles de gel Number of cycles of freezing													
	10 Cycles		25 Cycles		50 Cycles		100 Cycles		150 Cycles		200 Cycles		300 Cycles	
	Témoins Reference Specimens k/cm ²	Gelées Frozen Specimens k/cm ²	Témoins Reference Specimens k/cm ²	Gelées Frozen Specimens k/cm ²	Témoins Reference Specimens k/cm ²	Gelées Frozen Specimens k/cm ²	Témoins Reference Specimens k/cm ²	Gelées Frozen Specimens k/cm ²	Témoins Reference Specimens k/cm ²	Gelées Frozen Specimens k/cm ²	Témoins Reference Specimens k/cm ²	Gelées Frozen Specimens k/cm ²	Témoins Reference Specimens k/cm ²	Gelées Frozen Specimens k/cm ²
0,50	131	80	145	45	148	0	158	0	165	0	162	0	162	0
0,75	198	148	213	125	222	136	240	99	251	0	266	0	266	0
1,00	286	220	300	226	321	174	368	153	376	125	375	105	375	105
1,25	364	304	400	278	418	230	463	183	448	153	476	137	476	137
1,50	420	355	441	321	526	263	558	216	510	171	596	134	596	134
1,75			544	348	594	274	619	263	648	212	669	167	669	167
2,00			563	333	610	303	716	254	760	155	755	167	755	167
2,25			611	540	709	578	780	436	806	465	794	235	794	235
2,50					730	598	821	556	841	452	882	430	882	430
2,75					701	681	714	469	776	396	791	491	791	491
3,00					808	771	899	734	860	621	867	769	867	769
3,63					928	967	931	813	962	635	1.100	737	1.100	800

TABLEAU N° 8

TABLE 8

INFLUENCE DE LA NATURE DU CIMENT SUR LA RESISTANCE AUX CYCLES DE GEL ET DE DEGEL
INFLUENCE OF THE NATURE OF THE CEMENT ON THE RESISTANCE TO CYCLES
OF FREEZING AND THAWING

PREMIERE EXPEDITION : C/E = 1,5

1ST BATCH OF SAMPLES : C/W = 1.5

Nature du ciment	Pourcentage de chute de résistances mécaniques Percentage loss of mechanical strength							Nature of the cement
	5 cycles	10 cycles	18 cycles	25 cycles	50 cycles	100 cycles	150 cycles	
Ciment sulfo-pouzzolani- que H	100	100	100	100	100	100	100	Sulpho-pozzolana cement H
Ciment de laitier sur- sulfaté F	68,5	100	100	100	100	100	100	Supersulphated slag cement F
Ciment de laitier cata- lysé à la soude G ...	25,5	43,4	51,5	61,9	64	—	—	Soda activated slag cement G
Ciment Portland A 250/315	—	26,3	—	46,6	77,8	100	100	Portland cement A 250/315
Ciment Portland B ter 250/315 « prise mer »	—	—	—	55	100	100	100	Portland cement B ter 250/315 « sea-water »
Ciment de laitier à base de cendre de lignite I	22,7	23,6	—	44	73,2	100	100	Slag cement with lignite ash I
Ciment de laitier au clinker D (mouture moyenne)	—	31,8	—	41	53	76	100	Clinker activated slag cement D (medium fineness)
Ciment de laitier au clinker E (fine mou- ture)	—	24,9	—	42,4	57,5	73	—	Clinker activated slag cement E (fine)

TABLEAU N° 9
 TABLE 9
 INFLUENCE DE LA NATURE DU CIMENT SUR LA RESISTANCE AUX CYCLES DE GEL ET DE DEGEL
 INFLUENCE OF THE NATURE OF THE CEMENT ON THE RESISTANCE TO CYCLES
 OF FREEZING AND THAWING

PREMIERE EXPEDITION : C/E = 1,75 1ST BATCH OF SAMPLES : C/W = 1.75

Nature du ciment	Pourcentage de chute de résistances mécaniques Percentage loss of mechanical strength							Nature of the cement
	5 cycles	10 cycles	18 cycles	25 cycles	50 cycles	100 cycles	150 cycles	
Ciment sulfo-pouzzolanique H	100	100	100	100	100	100	100	Sulpho-pozzolana cement H
Ciment de laitier sulfaté F	64,6	100	100	100	100	100	100	Super-sulphated slag cement F
Ciment Portland A 250/315	—	—	—	44,7	79	100	100	Portland cement A 250/315
Ciment Portland B ter 250/315 « prise mer »	—	—	—	44,5	67,4	75	100	Portland cement B ter 250/315 « sea-water »
Ciment de laitier à base de cendre de lignite I	—	28,7	—	44,5	66	100	100	Slag cement with lignite ash I
Ciment de laitier au clinker D (mouture moyenne)	—	35,9	—	45	56,3	71	100	Clinker activated slag cement D (medium fineness)
Ciment de laitier au clinker E (fine mouture)	—	—	—	43	57,7	75	85	Clinker activated slag cement E (fine)

TABLE 10

TABLEAU N° 10

INFLUENCE DE LA NATURE DU CIMENT SUR LA RESISTANCE AUX CYCLES DE GEL ET DE DEGEL
INFLUENCE OF THE NATURE OF THE CEMENT ON THE RESISTANCE TO CYCLES
OF FREEZING AND THAWING

TROISIEME EXPEDITION : C/E = 1,5

3RD BATCH OF SAMPLES : C/W = 1.5

Nature du ciment	Pourcentage de chute de résistances mécaniques Percentage loss of mechanical strength						Nature of the cement	
	5 cycles	10 cycles	18 cycles	25 cycles	50 cycles	100 cycles		150 cycles
Ciment sulfo-pouzzolanique H ter	86	100	100	100	100	100	100	Sulpho-pozzolana cement H ter
Ciment de laitier sulfaté F ter	37	49,5	60	68,2	87	—	—	Supersulphated slag cement F ter
Ciment Portland A ter 250/315	—	17	—	34	64	83	100	Portland cement A ter 250/315
Ciment Portland B ter 250/315 « prise mer »	—	—	—	55	100	100	100	Portland cement B ter 250/315 « sea-water »
Ciment de laitier à base de cendre de lignite I ter	—	34,4	—	52	69	100	100	Slag cement with lignite ash I ter
Ciment de laitier au clinker D ter (mouture moyenne)	—	26,6	—	36,5	47,4	71	100	Clinker activated slag cement D ter (medium fineness)
Ciment de laitier catalysé à la soude G ter	—	15	—	21	40	100	100	Soda activated slag cement G ter
Ciment alumineux J ter	—	8	—	0	17	12	22	High alumina cement J ter

TABLEAU N° II
TABLE II
INFLUENCE DE LA NATURE DU CIMENT SUR LA RESISTANCE AUX CYCLES DE GEL ET DE DEGEL
INFLUENCE OF THE NATURE OF THE CEMENT ON THE RESISTANCE TO CYCLES
OF FREEZING AND THAWING

TROISIEME EXPEDITION : C/E = 1,75 3RD BATCH OF SAMPLES : C/W = 1.75

Nature du ciment	Pourcentage de chute de résistances mécaniques Percentage loss of mechanical strength							Nature of the cement
	5 cycles	10 cycles	18 cycles	25 cycles	50 cycles	100 cycles	150 cycles	
Ciment sulfo-pouzzolanique H ter	60,5	100	100	100	100	100	100	Sulpho-pozzolana cement H ter
Ciment de laitier sulfaté F ter	34	43	55	56,6	79	72	100	Supersulphated slag cement F ter
Ciment Portland A ter	—	10	—	32	40	—	100	Portland cement A ter
Ciment Portland B ter	—	—	—	44,5	67,4	75	100	Portland cement B ter
Ciment de laitier à base de cendre de lignite I ter	—	41	—	58	57	100	100	Slag cement with lignite ash I ter
Ciment de laitier au clinker D ter	—	33	—	49	54	85	100	Clinker activated slag cement D ter
Ciment de laitier catalysé à la soude G ter	—	4	—	5	14	55	88	Soda activated slag cement G ter
Ciment alumineux J ter	—	0	—	3,5	0	0	0	High alumina cement J ter

TABLEAU N° 12
 INFLUENCE DE LA NATURE DU CIMENT SUR LA RESISTANCE AUX CYCLES DE GEL ET DE DEGEL
 INFLUENCE OF THE NATURE OF THE CEMENT ON THE RESISTANCE TO CYCLES
 OF FREEZING AND THAWING

TROISIEME EXPEDITION : C/E = 2,00 3RD BATCH OF SAMPLES : C/W = 2,00

Nature du ciment	Pourcentage de chute de résistances mécaniques Percentage loss of mechanical strength						Nature of the cement
	5 cycles	10 cycles	18 cycles	25 cycles	50 cycles	100 cycles	
Ciment sulfo-pouzzolanique H ter	51	68	100	100	100	100	100
Ciment de laitier sulfaté F ter	17,7	32	54	55	76	—	—
Ciment Portland A ter	—	17	—	23	31	38	29
Ciment Portland B ter	—	—	—	18	42,6	41,5	60
Ciment de laitier à base de cendre de lignite I ter	—	33	—	48	56	78	100
Ciment de laitier au clinker D ter	—	31	—	47	63	95	100
Ciment de laitier catalysé à la soude G ter	—	0	—	8	20	50	63
Ciment alumineux J ter	—	4	—	0	5	2	1

TABLEAU N° 13
**INFLUENCE DE LA FINESSE DE MOUTURE DU CIMENT DE LAITIER AU CLINKER SUR LA RESISTANCE
 AUX CYCLES DE GEL ET DEGEL**
**INFLUENCE OF THE FINENESS OF GRINDING OF CLINKER ACTIVATED SLAG CEMENT
 ON THE RESISTANCE TO CYCLES OF FREEZING AND THAWING**

ESSAIS EFFECTUES AVEC LES CEMENTS C TER, D TER, TESTS MADE WITH CEMENTS C TER, D TER, E TER
 E TER ADDITIONNES DE 1 % DE CaCl₂ : C/E = 1,5 WITH ADMIXTURE OF 1 % CaCl₂ — C/W RATIO = 1.5

Nature du ciment	Pourcentage de chute de résistances mécaniques Percentage loss of mechanical strength					Nature of the cement
	10 cycles	25 cycles	50 cycles	100 cycles	150 cycles	
Ciment de laitier au clinker C ter (mouture grossière)	18	40	60	85	100	Clinker activated slag cement C ter (course grinding)
Ciment de laitier au clinker D ter (mouture moyenne)	27	36,5	47,4	71	100	Clinker activated slag cement D ter (medium grinding)
Ciment de laitier au clinker E ter (mouture fine)	33	42	60	74	100	Clinker activated slag cement E ter (fine grinding)

TABLEAU N° 14

TABLE 14

INFLUENCE DU C/E SUR LES ALLONGEMENTS D'ÉPROUVETTES
3 × 3 × 10 SOUMISES AUX CYCLES DE GEL ET DEGEL

INFLUENCE OF THE C/W RATIO ON THE ELONGATION
OF 3 × 3 × 10 SPECIMENS SUBJECTED
TO FREEZING AND THAWING

CIMENT PORTLAND B 250/315 « PRISE MER »
PORTLAND CEMENT B 250/315 — « SEA-WATER »

C — E C — W	Allongements en % après : % of elongation after :					
	5 cycles	10 cycles	18 cycles	25 cycles	50 cycles	100 cycles
1,00	0,2	0,47	1,11	détruit		
1,25	0,12	0,31	0,6	détruit		
1,50	0,10	0,17	0,35	0,57	détruit	
1,75	0,04	0,06	0,11	0,15	0,38	détruit
2,00	0,02	0,03	0,05	0,08	0,12	0,33

TABLEAU N° 15

TABLE 15

INFLUENCE DU C/E SUR LES ALLONGEMENTS D'ÉPROUVETTES
3 × 3 × 10 SOUMISES AUX CYCLES DE GEL ET DEGEL

INFLUENCE OF THE C/W RATIO ON THE ELONGATION
OF 3 × 3 × 10 SPECIMENS SUBJECTED
TO FREEZING AND THAWING

CIMENT PORTLAND A 250/315 TITRANT 1,49 % DE CaO LIBRE
PORTLAND CEMENT A 250/315 WITH 1.49 % FREE CaO CONTENT

C — E C — W	Allongements en % après : % of elongation after :					
	5 cycles	10 cycles	25 cycles	50 cycles	100 cycles	150 cycles
1,00	0,28	0,54	détruit			
1,25	0,03	0,08	0,40	détruit		
1,50	0,04	0,09	0,30	détruit		
1,75	0,02	0,04	0,07	0,06	détruit	
2,00	0,01	0,03	0,04	0,04	détruit	
2,25	0,01	0,02	0,02	0,03	0,06	0,12

TABLEAU N° 16

TABLE 16

INFLUENCE DU C/E SUR LES ALLONGEMENTS D'ÉPROUVETTES
3 × 3 × 10 SOUMISES AUX CYCLES DE GEL ET DEGEL

INFLUENCE OF THE C/W RATIO ON THE ELONGATION
OF 3 × 3 × 10 SPECIMENS SUBJECTED
TO FREEZING AND THAWING

CIMENT DE LAITIER AU CLINKER D (sans CaCl²)

CLINKER ACTIVATED SLAG CEMENT D (without CaCl²)

$\frac{C}{E}$ $\frac{C}{W}$	Allongements en % après : % of elongation after :					
	5 cycles	10 cycles	25 cycles	50 cycles	100 cycles	150 cycles
0,50	0,4	0,85	2	détruit		
0,75	0,06	0,48	1,58	1,98	détruit	
1,00	0,18	0,42	0,92	1,83	détruit	
1,25	0,30	0,46	0,80	1,22	détruit	
1,50	0,12	0,22	0,45	0,72	1,50	détruit
1,75	0,03	0,07	0,22	0,48	0,90	détruit
2,00	0,02	0,04	0,20	0,37	0,65	détruit
2,25	0,01	0,03	0,14	0,26	0,45	détruit
2,50	0,01	0,02	0,13	0,23	0,39	détruit
2,75	0,01	0,12	0,07	0,09	0,11	0,13
3,00	0,01	0,01	0,03	0,04	0,06	0,07
3,63	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00

TABLEAU N° 17

TABLE 17

RESISTANCE AUX CYCLES DE GEL ET DEGEL DU MELANGE 60 % DE PORTLAND 250/315 + 40 %
 DE CENDRES VOLANTES D'USINE THERMIQUE BROYEES EN FONCTION DU TEMPS DE DURCISSEMENT PREALABLE
 RESISTANCE TO CYCLES OF FREEZING AND THAWING OF A MIXTURE OF 60 % PORTLAND
 CEMENT 250/315 + 40 % GROUND FLY ASH FROM A POWER STATION,
 AS A FUNCTION OF THE INITIAL HARDENING TIME

C = PORTLAND + CENDRE OU INERTE = 1,5
 E = PORTLAND ASH OR INERT MATERIAL = 1,5
 W = W

Temps de durcissement préalable au gel	Nature du mélange	Nombre de cycles de gel et dégel / Number of cycles of freezing and thawing												Nature of the mixture	Initial hardening time before freezing tests
		10 cycles			25 cycles			50 cycles			100 cycles				
		Témoin Référence k/cm ²	Gelées Frozen specimens	Témoin Référence k/cm ²	Gelées Frozen specimens	Témoin Référence k/cm ²	Gelées Frozen specimens	Témoin Référence k/cm ²	Gelées Frozen specimens	Témoin Référence k/cm ²	Gelées Frozen specimens	Témoin Référence k/cm ²	Gelées Frozen specimens		
21 jours	Portland + cendre	360	100	380	0	420	0	505	0	0	0	0	0	Portland + ash Portland + inert material Pure Portland	21 days
	Portland + inerte Portland pur	160 380	0 200	165 390	0 0	185 400	0 0	215 450	0 0	225	145	195	Portland + ash Portland + inert material Pure Portland		
90 jours	Portland + cendre	510	330	530	265	540	225	555	145	230	160	275	605	Portland + ash Portland + inert material Pure Portland	90 days
	Portland + inerte Portland pur	210 450	105 320	215 455	0 110	230 460	0 0	250 480	0 0	275	195	300	Portland + ash Portland + inert material Pure Portland		
1 an	Portland + cendre	555	500	565	340	570	275	605	195	280	505	300	515	Portland + ash Portland + inert material Pure Portland	1 year
	Portland + inerte Portland pur	265 495	155 350	270 500	0 110	280 505	0 0	300 515	0 0	300	515	0	0	Portland + ash Portland + inert material Pure Portland	

TABLEAU N° 18

TABLE 18

INFLUENCE D'UNE ADDITION DE TEEPOL SUR LA TENUE AUX CYCLES DE GEL ET DE GEL
DES PORTLANDS A ET B ET DU CIMENT DE LAITIER AU CLINKER

(Essais effectués au même C/E)

INFLUENCE OF THE ADDITION OF TEEPOL ON THE RESISTANCE TO CYCLES OF FREEZING
AND THAWING OF PORTLAND CEMENTS A AND B AND THE CLINKER ACTIVATED SLAG CEMENT
(Tests carried out with the same C/W)

Nature du ciment	Quantité de teepol ajouté <i>Amount of teepol added</i>	Nombre de cycles de gel et dégel <i>Number of cycles of freezing and thawing</i>												Nature of the cement
		10 cycles		25 cycles		50 cycles		100 cycles		100 cycles		100 cycles		
		Témoins Réfere- nce speci- mens k/cm ²	Gelées Frozen speci- mens k/cm ²	Témoins Réfere- nce speci- mens k/cm ²	Gelées Frozen speci- mens k/cm ²	Témoins Réfere- nce speci- mens k/cm ²	Gelées Frozen speci- mens k/cm ²	Témoins Réfere- nce speci- mens k/cm ²	Gelées Frozen speci- mens k/cm ²	Témoins Réfere- nce speci- mens k/cm ²	Gelées Frozen speci- mens k/cm ²	Témoins Réfere- nce speci- mens k/cm ²	Gelées Frozen speci- mens k/cm ²	
Portland A	0 ‰	315	150	325	0	350	0	420	0	420	0	420	0	Portland cement A
	1 ‰	275	250	300	225	325	175	380	250	380	125	380	125	Portland cement A
	5 ‰	195	190	200	195	225	200	250	200	250	175	250	175	Portland cement A
Portland B	0 ‰	345	280	375	230	425	130	500	500	500	0	500	0	Portland cement B
	1 ‰	275	275	295	295	325	310	400	400	400	300	400	300	Portland cement B
	5 ‰	260	260	280	280	310	310	380	380	380	320	380	320	Portland cement B
Ciment de laitier au clinker	0 ‰	410	340	425	300	455	275	525	525	525	225	525	225	Clinker acti- vated slag cement
	1 ‰	355	340	375	325	400	280	475	475	475	230	475	230	Clinker acti- vated slag cement
	5 ‰	300	300	300	300	325	290	375	375	375	230	375	230	Clinker acti- vated slag cement

TABLEAU N° 19

TABLE 19

INFLUENCE DE LA NATURE DU CIMENT SUR LA RESISTANCE AUX CYCLES DE GEL ET DEGEL
 INFLUENCE OF THE NATURE OF THE CEMENT ON THE RESISTANCE
 TO CYCLES OF FREEZING AND THAWING

DEUXIEME SERIE D'ESSAIS

SECOND SERIES OF TESTS

Nature du ciment	C — E C — W	Pourcentage de chute de résistances mécaniques Percentage loss of mechanical strength					Nature of the cement
		10 cycles	25 cycles	50 cycles	100 cycles	150 cycles	
Portland 1 à haute teneur en silice	1,25	67	100	100	100	100	Portland cement 1 with high silica content
Portland 2 « prise mer »		43	100	100	100	100	Portland cement 2 (sea water)
Portland 3 ordinaire		67	100	100	100	100	Portland cement 3 (ordinary)
Ciment de laitier sursulfaté 4		56	93	100	100	100	Supersulphated cement 4
Ciment de laitier au clinker 5		25	37	52	80	100	Clinker activated cement 5
Portland 1 à haute teneur en silice	1,6	55	100	100	100	100	Portland cement 1 with high silica content
Portland 2 « prise mer »		34	64	100	100	100	Portland cement 2 (sea water)
Portland 3 ordinaire		44	68	100	100	100	Portland cement 3 (ordinary)
Ciment de laitier sursulfaté 4		46	75	100	100	100	Supersulphated cement 4
Ciment de laitier au clinker 5		30	43	50	82	100	Clinker activated cement 5
Portland 1 à haute teneur en silice	2	50	73	100	100	100	Portland cement 1 with high silica content
Portland 2 « prise mer »		15	25	43	60	100	Portland cement 2 (sea water)
Portland 3 ordinaire		35	38	90	100	100	Portland cement 3 (ordinary)
Ciment de laitier sursulfaté 4		53	73	100	100	100	Supersulphated cement 4
Ciment de laitier au clinker 5		25	45	55	66	73	Clinker activated cement 5

ESSAIS EFFECTUES AU LABORATOIRE
de VIENNE

TESTS CARRIED OUT BY THE VIENNA
LABORATORY

TABLEAU N° 20

TABLE 20

**ESSAIS DU LABORATOIRE DE VIENNE
TESTS CARRIED OUT BY THE VIENNA LABORATORY**

PREMIERE SERIE (1)

FIRST SERIES (1)

(2)	B	J	G	E	D	C	I	A	F	H	(2)
Tamis 900	0,16	0,1	0,28	0,24	0,5	0,24	0,04	0,06	0,3	0,08	Siene 900
» 4.900	5,3	1,9	0,6	0,9	1,0	0,6	0,3	1,7	0,9	0,3	» 4.900
Blaine	3.310	3.510	4.550	4.860	4.330	3.770	5.080	3.420	5.370	6.480	Blaine reading
Eau (°o)	23,5	23,7	25,0	25,0	25,0	25,0	28,3	25,2	24,6	34,8	Water %
Additions g/litre ..	0	0	50 NaOH	16,5 CaCl ₂	16,5 CaCl ₂	16,5 CaCl ₂	25 CaCl ₂	0	0	16,5 CaCl ₂	Admixtures g/litre
Début prise	2 h 20	2 h 30	1 h 35	2 h 55	3 h 20	3 h 25	4 h 00	2 h 35	2 h 15	4 h 15	Start of setting
Fin prise	5 h 10	3 h 05	3 h 05	4 h 40	5 h 10	5 h 30	8 h 35	4 h 40	7 h 30	12 h 55	End of setting
Résistance 3 j ..	191	603	204	254	218	181	89	162	113	165	3 days
à 7 j ..	312	679	285	364	327	269	173	244	335	261	7 »
à 28 j ..	503	753	326	481	473	400	287	421	632	345	Compressive strength
à 56 j ..	529	757	365	520	525	458	379	529	765	382	28 »
à 90 j ..	575	705	387	549	571	498	448	545	764	419	56 »
Résistance 3 j ..	40	59	55	50	42	35	20	35	27	36	3 days
à 7 j ..	62	68	64	72	63	50	40	50	58	52	7 »
à 28 j ..	76	77	68	83	81	79	59	75	93	63	Bending strength
à 56 j ..	84	72	67	90	89	87	69	85	78	66	28 »
à 90 j ..	88	74	65	83	83	88	80	91	83	68	56 »
0 %o N = 20 ..	0,09	0,07	0,60	1,09	1,43	1,31	3,30	3,62	4,08	9,08	0 %o N = 20
Expansion 40 ..	0,15	0,17	1,30	2,81	3,43	3,18	5,29	6,84	9,44(*)	15,21(*)	Expansion after
Après 60 ..	0,17	0,19	2,71(*)	4,13	4,87	4,76	7,69	10,19(*)	/	/	N cycles
N cycles 80 ..	0,21	0,21	4,90(*)	5,47	6,21	6,23	10,26	13,99(*)	/	/	freezing
gel et dégel 100 ..	0,23	0,23	/	6,74	7,44	8,88(*)	/	16,33(*)	/	/	and thawing

(1) Liant : 450 g. — Sable fin : 450 g. — Sable grossier : 900 g.

Eau : 270 g. — C/E = 1,66.

(2) Voir désignation des ciments sur tableau n° 1a

(*) Mesures déjà incertaines.

(1) Cement : 450 g. — Fine sand : 450 g. — Course sand : 900 g.

Water : 270 g. — C/W = 1,66.

(2) See notations on table 1a.

(*) The measurements already lack certainty.

TABLE 21

TABLEAU N° 21

**ESSAIS DU LABORATOIRE DE VIENNE
TESTS CARRIED OUT BY THE VIENNA LABORATORY**

SECOND SERIES

DEUXIEME SERIE

Ciment	E/C W/C	Finesse 4900 MS Fineness 4900 Mesh %	Résistance à la traction Tensile strength						Résistance à la compression Compressive strength						Allongement mm/m (21 jours d'immersion) Elongation mm/m (21 days immersion)					Cement
			jours days			jours days			jours days			jours days			Nombre de cycles no. of cycles					
			3	7	28	3	7	28	3	7	28	3	7	28	20	40	60	80	100	
N° 1 CPA 250/315	0,5 0,625 0,8	5,9 — —	43	57	78	81	234	333	514	605	3,13	6,01	8,88	12,13	15,37	No. 1 Portland cement A 250/ 315				
			27	37	59	66	144	200	332	427	7,05	13,74	détruit	détruit	détruit					
			18	25	39	49	89	125	202	263	12,35	24,37								
N° 2 CPA 250/315	0,5 0,625 0,8	3,36 — —	53	67	84	93	283	382	563	664	0,13	0,23	0,35	0,41	0,53	No. 2 Portland cement 250/315				
			40	49	69	76	186	251	427	495	1,18	2,17	2,94	3,68	4,49					
			24	35	53	62	107	152	258	339	2,29	4,34	6,47	8,40	10,85					
N° 3 CPA 250/315	0,5 0,625 0,8	7,3 — —	51	65	81	83	265	371	514	577	1,18	3,33	6,21	9,37	détruit	No. 3 Portland cement 250/315				
			37	48	63	69	183	262	392	432	2,67	7,06	12,26	17,56	détruit					
			24	33	44	53	99	160	232	261	4,83	11,23	détruit	détruit	détruit					
N° 4 Ciment de laitier sursulfaté	0,5 0,625 0,8	1,32 — —	59	86	94	92	287	460	641	676	2,25	5,97	9,87	14,29	19,26	No. 4 Super- sulphated slag cement				
			53	71	82	90	236	388	586	647	3,75	9,91	17,91	26,91	détruit					
			38	61	69	79	154	298	489	583	5,69	14,62	23,85	détruit	détruit					
N° 5 Ciment de laitier binaire (70 % de laitier — 30 % de CPA) (*)	0,5 0,625 0,8	1,04 — —	50	67	87	90	288	385	520	577	0,03	0,13	0,23	0,26	0,45	No. 5 Binary slag (70 % 30 % cement) (*)				
			38	52	72	80	192	274	393	455	0,90	2,41	3,87	5,09	6,24					
			22	37	57	64	111	178	273	322	2,82	5,28	7,77	10,16	12,59					

(*) Dans l'eau de gâchage 1 % de CaCl₂ (sec) du poids de ciment. (*) The mixing water contained 1 % CaCl₂ (dry) by weight of cement.

ESSAIS EFFECTUES AU LABORATOIRE
du CEMENT-OCH-BETONG
à LIMHAMN

TESTS CARRIED OUT BY THE
CEMENT-OCH-BETONG LABORATORY
at LIMHAMN

TABLEAU N° 22
 TABLE 22
 ESSAIS DU LABORATOIRE DE CEMENT-OCH-BETONG A LIMHAMN
 TESTS CARRIED OUT BY THE « CEMENT-OCH-BETONG » LABORATORY AT LIMHAMN

Nature du ciment Nature of the cement	Fréquence de vibration en % de la fréquence initiale après : Vibration frequency, as a % of the initial frequency, after :					
	10 cycles	25 cycles	50 cycles	100 cycles	150 cycles	250 cycles
Ciment de laitier sursulfaté F	86	61	< 50	< 50	< 50	< 50
Ciment Portland 250/315 A ..	86	61	< 50	< 50	< 50	< 50
Ciment Portland 250/315 B ..	92	82	70	60	55	50
Ciment de laitier au clinker C (mouture grossière)	95	88	81	75	73	60
Ciment de laitier au clinker D (mouture moyenne)	98	96	93	91	90	85
Ciment de laitier au clinker E (mouture fine)	97	94	91	89	88	83

Supersulphated slag cement F
 Portland cement 250/315 A ..
 Portland cement 250/315 B ..
 Clinker activated slag cement
 C (coarse) ..
 Clinker activated slag cement
 D (medium) ..
 Clinker activated slag cement
 E (fine) ..

ESSAIS EFFECTUES AU LABORATOIRE
de la Sté des CHAUX et CEMENTS
de LAFARGE et du TEIL

TESTS CARRIED OUT BY THE LABORATORY
of the
“Société des CHAUX et CEMENTS
de LAFARGE et du TEIL”

TABLE 23 a

CARACTERISTIQUES MECANIKUES DES CIMENTS MECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE CEMENTS

TABLEAU N° 23 a

Ciment Density	Rejet Residue	Flouo- metric 30 μ	Prise Setting		Résistance à la compression Compressive Strength						Cement		
			Début Start	Fin End	Mortier 1/3 Mortar 1/3		Béton 300/400/800 Concrete 300/400/800						
					jours days	M mtls	jours days	2	7	28		3	
N° 1	8,9	53,4	2 h 05	4 h 10	240	430	575	680	132	225	295	315	N° 1
N° 2	7,7	57	3 h 30	6 h 00	200	375	555	710	111	193	317	335	N° 2
N° 3	11,6	42,6	4 h 20	8 h 00	135	290	425	540	125	270	385	410	N° 3
N° 4	2	67,4	5 h 50	10 h 00	157	432	585	690	98	260	480	490	N° 4
N° 5 avec CaCl ₂	1,9	62,9	3 h 20	5 h 50	162	340	500	595	114	204	294	265	N° 5 with CaCl ₂

TABLE 23 b

CHEMICAL CHARACTERISTICS

TABLEAU N° 23 b

CARACTERISTIQUES CHIMIQUES

Ciment Cement	Insol. Insoluble	SiO ₂	MnO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	CO ₂	H ₂ O + M.V.	S	Total Total	CaO libre Free CaO
N° 1 ..	0,45	24,75	—	2,5	1,0	66,35	1,6	1,75	0,95	0,75	oui	100,1	1,4
N° 2 ..	2,6	23,65	—	4,0	4,3	59,60	1,5	1,8	0,75	1,4	non	99,6	1,25
N° 3 ..	1,5	20,8	—	5,25	2,85	63,4	1,75	2,1	0,7	1,0	non	99,35	1,8
N° 4 ..	0,8	25,65	0,55	11,75	1,60	44	3,3	10,25	0,35	1,15	0,8	100,2 0,4	0,1
N° 5 ..	0,4	30,1	0,5	10,8	1,65	51,5	3,15	0,6	0,35	0,4	0,65	99,8 100,10 0,35	0,4
												99,75	

ESSAIS EFFECTUES AU LABORATOIRE
d'ALBERTVILLE

TESTS CARRIED OUT BY THE ALBERTVILLE
LABORATORY

TABLEAU N° 24

TABLE 24

RESULTATS DES ESSAIS EFFECTUES
PAR LE LABORATOIRE D'ALBERTVILLE
RESULTS OF THE TESTS CARRIED OUT
BY THE ALBERTVILLE LABORATORY

Nature du ciment <i>Nature of the cement</i>	E — C <i>W — C</i>	Vitesse du son mètre/seconde après : <i>Speed of sound m./sec. after :</i>					
		0 cycle	10 cycles	25 cycles	50 cycles	100 cycles	140 cycles
1	0,80	4125	2850	1050	—	—	—
2		4250	3000	1650	—	—	—
3		4250	3600	2450	—	—	—
4		4100	2350	1050	—	—	—
5		4000	4000	4000	4000	3700	3700
1	0,62	4225	3625	2775	1450	—	—
2		4500	4150	3600	3400	3100	2700
3		4200	4050	3850	3500	2875	2350
4		4100	4100	3300	2450	—	—
5		4150	4150	4200	4200	4150	3900

- 1 = Ciment Portland n° 1 250/315 à haute teneur en silice.
 2 = Ciment Portland n° 2 250/315 « prise mer ».
 3 = Ciment Portland n° 3 250/315.
 4 = Ciment de laitier sursulfaté 4.
 5 = Ciment de laitier au clinker 5.
 1 = *Portland cement n° 1 250/315 with high silica content.*
 2 = *Portland cement n° 2 250/315 « sea-water ».*
 3 = *Portland cement n° 3 250/315.*
 4 = *Supersulphated slag cement 4.*
 5 = *Clinker activated slag cement 5.*

ESSAIS EFFECTUES AU LABORATOIRE DU CENTRE
d'ETUDES et de RECHERCHES
des LIANTS HYDRAULIQUES

TESTS CARRIED OUT BY THE LABORATORY of the
"CENTRE d'ETUDES et de RECHERCHES
des LIANTS HYDRAULIQUES"

TABLEAU N° 25
 TABLE 25
 CARACTERISTIQUES DES LIANTS
 CHARACTERISTICS OF THE CEMENTS
 PREMIERE SERIE D'ESSAIS
 FIRST SERIES OF TESTS

Nature du ciment	Poids spécifique Specific weight	Surface spécifique Blaine Specific surface Blaine reading cm ² /g	Eau de gâchage Mixing water %	Durée de prise Setting				Etallement du mortier Flow of the mortar %	Nature of the cement
				Début Start	Fin End	Fin End	Fin End		
Portland A 250/315	3,08	3.400	27,0	3 h 20	9 h 15	9 h 15	39	Portland cement A 250/315	
Portland B 250/315	3,06	3.340	26,8	3 h 30	9 h 15	9 h 15	48	Portland cement B 250/315	
Ciment de laitier au clinker C (mouture grossière)	3,03	3.630	27,2	3 h	> 9 h	> 9 h	114	Clinker activated slag cement C (coarse)	
Ciment de laitier au clinker D (mouture moyenne)	3,00	4.360	27,2	3 h	9 h	9 h	104	Clinker activated slag cement D (medium)	
Ciment de laitier au clinker E (fine mouture)	3,02	4.800	26,5	3 h	6 h 45	6 h 45	124	Clinker activated slag cement E (fine)	
Ciment de laitier sursulfaté F	2,98	5.200	25,6	2 h 35	10 h 25	10 h 25	121	Supersulphated slag cement F	
Ciment de laitier catalysé à la soude G	3,00	4.210	27,0	30'	1 h 20	1 h 20	74	Soda activated slag cement G	
Ciment sulfo-pozzolanique H	2,67	6.570	37,5	5 h 30	> 9 h	> 9 h	79	Sulpho-pozzolana cement H	
Ciment de laitier à base de cendre de lignite I	2,79	4.490	31,0	45'	9 h	9 h	33	Slag cement with lignite ash I	
Ciment alumineux J	3,23	3.120	25,5	3 h 30	4 h 40	4 h 40	29	High alumina cement J	

TABLEAU N° 26
 TABLE 26
 RESISTANCE A LA TRACTION PAR FLEXION EN kg/cm² EN FONCTION DES CYCLES DE GELIVITE
 TENSILE STRENGTH IN BENDING, IN kg/cm², AS A FUNCTION OF THE NUMBER OF CYCLES
 OF FREEZING AND THAWING

PREMIERE SERIE D'ESSAIS
 FIRST SERIES OF TESTS

Nature du ciment	Nature of the cement	CYCLES									
		0 (28 j) 28 days	20	30	40	50	100	150	200		
Portland A 250/315	Portland cement A 250/315	91,2				92,2	97,2	96	100,5		
Portland B 250/315	Portland cement B 250/315	81,6				87,4	92,8	91,5	85,5		
Ciment de laitier au clinker C (mouture grossiere)	Clinker activated slag cement C (coarse)	96,0				56,7	44,7	34,2	38,0		
Ciment de laitier au clinker D (mouture moyenne)	Clinker activated slag cement D (medium)	96,0				74,9	50,0	53,8	71,0		
Ciment de laitier au clinker E (fine mouture)	Clinker activated slag cement E (fine)	94,2				64,8	55,2	57,8	67,5		
Ciment de laitier sursulfaté F	Supersulphated slag cement F	92,8	28,8	32,6	39,8	—	90,4	86,3	87,8		
Ciment de laitier catalysé à la soude G	Soda activated slag cement G	85,5	13,7	18,5	8,5	103	—	—	—		
Ciment sulfo-pouzzolanique H	Sulpho-pozzolana cement H	66,8									
Ciment de laitier à base de cendre de lignite I	Slag cement with lignite ash I	64,5	21,0			23,4	8,5		17,0		
Ciment alumineux J	High alumina cement J	91,0				98,7	103	103,5	104		

TABLEAU N° 27
 TABLE 27
 RESISTANCE A LA COMPRESSION EN kg/cm² EN FONCTION DES CYCLES DE GELIVITE
 COMPRESSIVE STRENGTH IN kg/cm² AS A FUNCTION OF THE NUMBER
 OF CYCLES OF FREEZING AND THAWING

FIRST SERIES OF TESTS

PREMIERE SERIE D'ESSAIS

Nature du ciment	0 (28 j) 28 days	CYCLES							Nature of the cement
		20	30	40	50	100	150	200	
Portland A 250/315	532				654	732	755	765	Portland cement A 250/315
Portland B 250/315	479				597	657	720	700	Portland cement B 250/315
Ciment de laitier au clinker C (mouture grossière)	466				480	470	390	440	Clinker activated slag cement C (coarse)
Ciment de laitier au clinker D (mouture moyenne)	531				600	515	499	504	Clinker activated slag cement D (medium)
Ciment de laitier au clinker E (fine mouture)	522				597	570	502	508	Clinker activated slag cement E (fine)
Ciment de laitier sursulfaté F ..	685	581	556	485	—	—	—	—	Supersulphated slag cement F
Ciment de laitier catalysé à la soude G	430	273	313	255	457	428	392	390	Soda activated slag cement G
Ciment sulfo-pouzzolanique H ..	378				—	—	—	—	Sulpho-pozzolana cement H
Ciment de laitier à base de cen- dre de lignite I	280	260			281	165	—	170	Slag cement with lignite ash I
Ciment alumineux J	969				1069	1047	1075	1050	High alumina cement J

TABLEAU N° 28

GONFLEMENT EN μ/m EN FONCTION DES CYCLES DE GELIVITE
 EXPANSION IN μ/m AS A FUNCTION OF THE NUMBER OF CYCLES
 OF FREEZING AND THAWING

FIRST SERIES OF TESTS

PREMIERE SERIE D'ESSAIS

Nature du ciment	C Y C L E S																	
	0 jours	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	175	200
A	31	31	31	63	31	31	63	31	31	31	31	63	63	125	94	63	94	94
B	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	156	125	125	125
C	31	188	438	719	1094	1406	1750	2094	2219	2344	2438	2531	2656	2719	2844	2938	3719	3719
D	94	156	375	594	781	906	1125	1375	1406	1469	1563	1625	1719	1813	1875	1938	2281	2281
E	94	250	531	688	938	1063	1313	1469	1563	1625	1719	1781	1875	1969	2063	2188	2625	2625
F	94	1000	2094	3469	5438	7250	9688	1250	1563	1625	1719	1781	1875	1969	2063	2188	2625	2625
G	63	0	63	125	250	375	469	656	781	875	1000	1000	1156	1344	1469	1625	2250	2938
H	375	3500	3969	5875	9688	14938	1938	4094	4719	5313	5594	6031	6219	6438	6969	7406	8901	13750
I	63	438	1063	1500	2063	2781	3500	4094	4719	5313	5594	6031	6219	6438	6969	7406	8901	13750
J	94	125	156	188	219	219	188	219	219	219	219	281	344	313	313	313	313	344

- A = Ciment Portland A 250/315.
- B = Ciment Portland B 250/315.
- C = Ciment de laitier au clinker C (mouture grossière).
- D = Ciment de laitier au clinker D (mouture moyenne).
- E = Ciment de laitier au clinker E (mouture fine).
- F = Ciment de laitier sursulfaté.
- G = Ciment de laitier catalysé à la soude.
- H = Ciment sulfo-pozzolanique.
- I = Ciment de laitier à base de cendre de lignite.
- J = Ciment alumineux.

- A = Portland cement A 250/315.
- B = Portland cement B 250/315.
- C = Clinker activated slag cement C (coarse).
- D = Clinker activated slag cement D (medium).
- E = Clinker activated slag cement E (fine).
- F = Super sulphated slag cement.
- G = Soda activated slag cement.
- H = Sulpho-pozzolann cement.
- I = Slag cement with lignite ash.
- J = High alumina cement.

TABLEAU N° 29
 TABLE 29
 MODULE D'ELASTICITE EN FONCTION DES CYCLES DE GELIVITE EXPRIMES EN 1000 kg/cm²
 MODULUS OF ELASTICITY AS A FUNCTION OF THE CYCLES
 OF FREEZING AND THAWING, EXPRESSED IN 1000 kg/cm²

FIRST SERIES OF TESTS

PREMIERE SERIE D'ESSAIS

Nature du ciment Nature of the cement	0		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	200
	28 jours days	28 jours days																
A	390	377	418	422	431	437	437	437	432	439	437	448	442	444	426	450	455	450
B	376	382	381	395	403	407	411	413	407	413	414	414	404	416	389	403	420	420
C	355	364	371	326	329	338	320	315	315	324	324	?	294	275	322	342	331	283
D	378	370	380	324	380	378	321	321	315	324	324	332	332	333	340	333	375	358
E	370	370	293	310	316	375	364	364	364	356	356	340	349	323	340	340	341	343
F	383	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
G	317	319	318	332	343	346	347	347	347	—	340	344	338	268	339	337	—	—
H	308	227	233	186	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
I	270	258	184	?	?	180	?	?	?	?	?	?	183	183	—	—	—	—
J	478	465	490	480	462	471	460	460	470	464	473	480	446	473	482	498	466	480

A = Ciment Portland A 250/315.
 B = Ciment Portland B 250/315.
 C = Ciment de laitier au clinker C (mouture grossiere).
 D = Ciment de laitier au clinker D (mouture moyenne).
 E = Ciment de laitier au clinker E (mouture fine).
 F = Ciment de laitier sursulfaté.
 G = Ciment de laitier catalysé à la soude.
 H = Ciment sulfo-pozzolanique.
 I = Ciment de laitier à base de cendre de lignite.
 J = Ciment alumineux.
 A = Portland cement A 250/315.
 B = Portland cement B 250/315.
 C = Clinker activated slag cement C (course).
 D = Clinker activated slag cement D (medium).
 E = Clinker activated slag cement E (fine).
 F = Soda sulphated slag cement.
 G = Super sulphated slag cement.
 H = Soda activated slag cement.
 I = Sulpho-pozzolana cement.
 J = Slag cement with lignite ash.
 J = High alumina cement.

TABLEAU N° 30

TABLE 30

ESSAIS DU LABORATOIRE DU C.E.R.I.L.H.
TESTS OF THE LABORATORY OF THE C.E.R.I.L.H.

DEUXIEME SERIE
SECOND SERIES

Nature du ciment Nature of the cement	E — C C — W	Pourcentage de chute de résistances mécaniques après : Percentage loss of mechanical strength after :				
		10 cycles	20 cycles	30 cycles	40 cycles	50 cycles
1	0,8	48	100	100	100	100
2		5	7	9	12	15
3		11	29	43	57	73
4		12	36	58	74	90
5		25	30	32	33	34
1	0,62	25	38	57	68	86
2		2	2	3	3	3
3		3	5	8	10	12
4		8	15	0	40	45
5		12	14	16	18	20
1	0,5	18	28	34	42	48
2		1	2	3	3	4
3		12	21	25	28	30
4		5	13	20	25	28
5		4	6	8	10	12

- 1 = Ciment Portland n° 1 250/315 à haute teneur en silice.
2 = Ciment Portland n° 2 250/315 « prise mer ».
3 = Ciment Portland n° 3 250/315.
4 = Ciment de laitier sursulfaté 4.
5 = Ciment de laitier au clinker 5.

- 1 = Portland cement n° 1 250/315 with high silica content.
2 = Portland cement n° 2 250/315 « sea water ».
3 = Portland cement n° 3 250/315.
4 = Supersulphated slag cement 4.
5 = Clinker activated slag cement 5.

ESSAIS EFFECTUES AU LABORATOIRE DE
SOTTOCASTELLO de la S. A. D. E.
et au LABORATOIRE de SONDRIO de FALCK

TESTS CARRIED OUT BY THE LABORATORY of the
S. A. D. E. at SOTTOCASTELLO
and THE LABORATORY of the FALCK
at SONDRIO

TABLEAU N° 31
 TABLE 31
 ESSAIS SUR LES CIMENTS (suivant les normes italiennes de réception)
 TESTS ON CEMENTS (standard Italian acceptance tests)

PREMIERE SERIE D'ESSAIS FIRST SERIES OF TESTS

Nature du ciment (1)	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	Nature of the cement (1)
Additions	—	—	1 % CaCl ₂	1 % CaCl ₂	1 % CaCl ₂	—	3 % NaOH	1 % CaCl ₂	1,5 % CaCl ₂	—	Admixtures
Residu sur le tamis 4.900 .. %	2,58	6,13	1,11	1,12	1,19	1,21	0,84	0,61	0,29	2,42	Residue on 4.900 mesh sieve (%)
Surface spécifique Blaine .. cm ² /g	3.426	3.382	3.844	4.394	5.018	5.326	4.397	6.958	4.617	3.271	Specific surface, Blaine reading (cm ² /g)
Eau de gâchage pour la pâte pure .. %	29,2	26,4	26,8	26,8	26,6	25,4	27,0	38,4	35,0	24,0	Mixing water for pure paste (%)
Début prise .. %	3 h 25	2 h 50	2 h 50	2 h 50	2 h 35	4 h 35	0 h 20	5 h 55	8 h 13	3 h 45	Start of setting
Fin prise .. %	7 h 30	5 h 10	5 h 55	5 h 20	4 h 50	6 h 50	0 h 55	9 h 55	16 h 00	4 h 30	End of setting
Eau de gâchage pour le mortier .. %	7,75	7,10	7,20	7,20	7,20	6,90	7,30	8,70	8,00	7,00	Mixing water for the mortar
Résistance 3 jours à la traction sur mortier .. %	30	31	30	32	37	18	26	17	20	42	Tensile strength on mortar
» 7 »	36	32	36	39	39	33	30	27	30	43	» 7 »
» 28 »	40	38	40	43	45	47	32	36	38	46	» 28 »
» 90 »	44	43	42	46	46	54	33	46	42	48	» 90 »
Résistance 3 jours à la compression sur mortier .. %	465	493	425	493	555	265	390	305	243	653	Compressive strength on mortar
» 7 »	613	545	535	588	590	508	440	478	403	743	» 7 »
» 28 »	700	653	655	695	735	773	565	628	600	785	» 28 »
» 90 »	818	723	718	780	773	905	585	738	705	913	» 90 »

(1) Voir désignation des ciments sur tableau 1 a. (1) See notation of the cements on table 1 a.

TABLEAU N° 33

TABLE 33

ACIERIE ET FONDERIE LOMBARDE FALCK
 LABORATOIRE CENTRAL D'ESSAIS DE MATERIAUX DE VENINA
 STEEL WORKS FALCK - CENTRAL LABORATORY FOR TESTING
 MATERIALS AT VENINA

Ciment N° Cement N°	Rapport E/C W/C Ratio	Module d'élasticité dynamique en 1 000 kg/cm ² Dynamic modulus of elasticity in 1 000 kg/cm ²						Varia- tion en % Varia- tion %
		Au début de l'essai de gel <i>At beginning of freezing test</i>		Après 100 cycles de gel et dégel <i>After 100 cycles of freezing and thawing</i>		Eprouvette conservée dans l'eau à + 20° C <i>Specimen cured in water at 20°</i>		
		Valeur mesurée	Moyen.	Valeur mesurée	Moyen.	Valeur mesurée	Moyen.	
		<i>Measu- red value</i>	<i>Mean value</i>	<i>Measu- red value</i>	<i>Mean value</i>	<i>Measu- red value</i>	<i>Mean value</i>	
1 - 1	0,5	489		435				
2	»	489		435				
3	»	467	481,6	443	437,6			— 9,1
4	»	445				493		
5	»	456	452,3			456		
6	»	456				458	469	+ 3,7
1	0,8	366		426				
2	»	356		349				
3	»	366	362,6	326	367			+ 1,2
4	»	366				426		
5	»	366				430		
6	»	366	366			426	427,3	+ 16,7
2 - 1	0,5	458		491				
2	»	480		430				
3	»	447	461,6	426	449			— 2,7
4	»	458				422		
5	»	469				437		
6	»	458	461,6			480	446,3	— 3,3
1	0,8	383		409				
2	»	391		403				
3	»	391	388,3	405	405,6			+ 4,4
4	»	330				428		
5	»	348				424		
6	»	377	351,6			426	426	+ 21,1
3 - 1	0,8	362		381				
2	»	375		379				
3	»	372	369,6	401	387			+ 4,8
4	»	372				421		
5	»	372				447		
6	»	353	365,6			441	436	+ 19,4

TABLEAU N° 33 (suite)

TABLE 33 (continuation)

ACIERIE ET FONDERIE LOMBARDE FALCK
 LABORATOIRE CENTRAL D'ESSAIS DE MATERIAUX DE VENINA
 STEEL WORKS FALCK - CENTRAL LABORATORY FOR TESTING
 MATERIALS AT VENINA

Ciment N° Cement No	Rapport E/C W/C Ratio	Module d'élasticité dynamique en 1 000 kg/cm ² Dynamic modulus of elasticity in 1 000 kg/cm ²						Varia- tion en % Varia- tion %
		Au début de l'essai de gel At beginning of freezing test		Après 100 cycles de gel et dégel After 100 cycles of freezing and thawing		Eprouvette conservée dans l'eau à + 20° C Specimen cured in water at 20°		
		Valeur mesurée	Moyen.	Valeur mesurée	Moyen.	Valeur mesurée	Moyen.	
		Measu- red value	Mean value	Measu- red value	Mean value	Measu- red value	Mean value	
3 - 1	0,5	430		419				
	»	440		385				
	»	440	436,6	415	406,3			— 6,8
	»	430				423		
	»	440				440		
	»	440	436,6			423	428,6	— 1,8
4 - 1	0,5	469		439				
	»	469		410				
	»	426	454,6	424	424,3			— 6,5
	»	469				454		
	»	406				447		
	»	447	440,6			447	449,3	+ 1,9
1	0,8	407		250				
	»	407		250				
	»	438	417,3	250	250			
	»	427				460		— 40,0
	»	407				417		
	»	417	417			434	437	+ 4,8
5 - 1	0,5	451		455				
	»	451		455				
	»	462	454	455	455			+ 0,2
	»	451				457		
	»	440				430		
	»	430	440			430	439	— 0,2
1	0,8	438		237				
	»	449		244				
	»	449	445,3	202	227			— 49,0
	»	428				420		
	»	428				411		
	»	428	428			428	419	— 2,1

ESSAIS EFFECTUES AU LABORATOIRE de la JAPAN
CEMENT ENGINEERING ASSOCIATION à TOKYO

TESTS CARRIED OUT BY THE LABORATORY of the
JAPAN ENGINEERING ASSOCIATION at TOKYO

TABLEAU N° 34

TABLE 34

ESSAIS PHYSIQUES

PHYSICAL TESTS

Nature du ciment	Poids spécifique Specific weight	Temps de prise temp. 20° C Setting time temp. : 20° C		Eau de gâchage % Mixing water %	Finesse-Surface spécifique en cm ² /g Fineness specific surface in cm ² /g		Nature of the cement
		1 h 32 2 h 28 2 h 24 2 h 19 2 h 10 5 h 47 7 h 06 1 h 06	2 h 52 3 h 39 3 h 40 3 h 13 3 h 15 7 h 50 8 h 50 1 h 56		Lea-Nurse	Blaine	
Portland A 250/315	3,12	1 h 32	2 h 52	24,5	3.650	3.570	Portland cement A 250/315
Portland B 250/315	3,10	2 h 28	3 h 39	25,0	3.430	3.380	Portland cement B 250/315
Ciment de laitier au clinker C (mouture grossière)	2,98	2 h 24	3 h 40	27,5	3.770	3.450	Clinker activated slag cement C (coarse)
Ciment de laitier au clinker D (mouture moyenne)	2,98	2 h 19	3 h 13	25,5	4.430	4.410	Clinker activated slag cement D (medium)
Ciment de laitier au clinker E (mouture fine)	2,98	2 h 10	3 h 15	25,5	4.770	4.830	Clinker activated slag cement E (fine)
Ciment de laitier sursulfaté F	2,93	5 h 47	7 h 50	25,0	5.530	5.380	Supersulphated slag cement F
Ciment sulfo-pozzolamique H	2,31	7 h 06	8 h 50	38,5	5.610	5.510	Sulpho-pozzolana cement H
Ciment de laitier à base de cendre de lignite I	2,86	1 h 06	1 h 56	29,0	5.350	5.340	Slag cement with lignite ash I

TABLE 35

TABLEAU N° 35

CHEMICAL ANALYSIS

ANALYSES CHIMIQUES

Nature du ciment	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	CaO	MgO	SO ₃	S	Ig. L	Ins. R	Total	Nature of the cement
Portland A 250/315 ..	24,22	3,00	0,90	0,50	67,00	1,51	1,43	—	1,23	0,28	100,07	Portland cement A 250/315
Portland B 250/315 ..	21,91	5,27	3,36	0,28	60,64	1,80	2,00	—	1,29	2,61	99,43	Portland cement B 250/315
Ciment de laitier au clinker C (mouture grosnière)	29,31	11,55	1,00	0,59	51,36	3,33	0,43	0,64	1,05	0,77	100,03	Clinker activated slag cement C (coarse)
Ciment de laitier au clinker D (mouture moyenne)	29,72	11,42	1,37	0,40	51,74	3,37	0,42	0,37	0,55	0,28	99,64	Clinker activated slag cement D (medium)
Ciment de laitier au clinker E (fine mou- ture)	29,96	11,39	1,36	0,48	51,91	3,28	0,43	0,39	0,54	0,37	100,11	Clinker activated slag cement E (fine)
Ciment de laitier sur- sulfaté F	26,95	12,23	1,21	0,75	44,14	3,56	10,30	0,71	0,42	0,27	100,54	Supersulphated slag cement F
Ciment sulfo-pouzzola- mique H	12,93	7,39	2,87	0,28	25,13	2,36	5,96	0,32	9,58	32,84	99,79	Sulpho-pouzzolana cement H
Ciment de laitier à base de cendre de lignite I	23,23	12,28	3,42	0,63	43,59	2,98	1,66	0,59	1,47	10,54	100,39	Slag cement with lignite ash I

TABLEAU N° 36
 TABLE 36
 RESISTANCE A LA FLEXION ET A LA COMPRESSION DES MORTIERS
 BENDING STRENGTH AND COMPRESSIVE STRENGTH OF MORTARS

Nature du ciment	Résistance à la flexion Bending strength k/cm ²						Résistance à la compression Compressive strength k/cm ²						Nature of the cement
	Jours Days			Jours Days			Jours Days			Jours Days			
	3	7	28	3	7	28	3	7	28	3	7	28	
Portland A 250/315	44,5	56,5	71,9	74,9	189	265	399	475	Portland cement A 250/315				
Portland M 250/315	48,2	64,5	74,0	81,3	188	272	379	462	Portland cement B 250/315				
Ciment de laitier au clinker C (mouture grossière)	44,6	56,9	69,5	77,1	172	248	340	411	Clinker activated slag cement C (course)				
Ciment de laitier au clinker D (mouture moyenne)	43,7	60,6	73,2	91,2	189	282	402	490	Clinker activated slag cement D (medium)				
Ciment de laitier au clinker E (fine mouture)	50,2	64,3	76,6	86,0	220	302	426	503	Clinker activated slag cement E (fine)				
Ciment de laitier sursulfaté F	65,9	85,1	100,5	105,6	293	443	598	676	Supersulphated slag cement F				
Ciment sulfo-pozzolanique H	36,7	54,0	67,0	73,8	160	263	355	420	Sulpho-pozzolana cement H				
Ciment de laitier à base de cendre de lignite I	40,7	58,6	75,2	86,7	159	250	370	456	Slag cement with lignite ash I				

TABLEAU N° 37

TABLE 37

GRANULOMETRIE

GRADING

	Poids spécifique Specific weight	Eau d'absorption Water absorption %	Granulométrie % des grains traversant un tamis de mailles en mm % grading of particles passing sieves with mesh (in mm)					Module de finesse Modulus of fineness			
			5	2,5	1,2	0,6	0,3			0,15	
Sable (district) de Sagamigawa	2,60	2,90	100	90,6	74,5	50,0	16,5	1,3	2,67	Sand (district) of Sagamigawa	
			Ouverture des mailles mm Mesh opening (in mm)								
			40	25	20	15	10,5				
Gravillon	2,63	1,53	—	100	75	—	50		6,75	Small gravel	

TABLEAU N° 38

COMPOSITION DU BETON

TABLE 38

COMPOSITION OF CONCRETE MIX

Nature du ciment	Dimen- sion max. de l'agrè- gat Max agg. size	Slump Slump	E/C W/C	C/E C/W	Rapport sable grav. Sand Gravel ratio	Mélange de base pr. 1 m ³ de béton (kg) Basic mix per 1 m ³ concrete (kg)				Nature of the cement	
						Ciment Cement	Eau Water	Sable Sand	Gravil- lon Gravel		CaCl ₂
Portland A 250/315	25	6,0	52,3	1,91	1,52	300	157	777	1178	—	Portland A 250/315
Portland B 250/315	25	6,0	52,0	1,92	1,52	300	156	777	1178	—	Portland B 250/315
Ciment de laitier au clin- ker C (mouture gros- sière)	25	6,0	48,3	2,07	1,52	300	145	784	1191	3	Clinker activated slag ce- ment C (course)
Ciment de laitier au clin- ker D (mouture moyenne)	25	6,0	48,0	2,08	1,52	300	144	785	1192	3	Clinker activated slag ce- ment D (medium)
Ciment de laitier au clin- ker E (fine mouture) ..	25	6,0	47,7	2,09	1,52	300	143	786	1194	3	Clinker activated slag ce- ment E (fine)
Ciment de laitier sursul- faté F	25	6,5	49,0	2,04	1,52	300	147	781	1184	—	Supersulphated slag ce- ment F
Ciment sulfo-pouzzolani- que H	25	6,0	52,7	1,90	1,52	300	158	741	1123	4,5	Sulpho-pouzzolana cement H
Ciment de laitier à base de cendre de lignite I	25	6,0	48,3	1,96	1,52	300	145	780	1184	4,5	Slag cement with lignite ash I

TABLEAU N° 39
 TABLE 39
 RESISTANCE A LA COMPRESSION ET A LA TRACTION DU BETON
 COMPRESSIVE STRENGTH AND TENSILE STRENGTH OF CONCRETES

Nature du ciment	Résistance à la compression kg/cm ² Compressive strength			Coef. de résistance à la traction kg/cm ² (1) Coeff. of tensile strength kg/cm ² (1)	Nature of the cement
	jours days				
	3	7	28		
Portland A 250/315	76	125	229	18,3	Portland cement A 250/315
Portland B 250/315	84	127	215	25,5	Portland cement B 250/315
Ciment de laitier au clinker C (mouture grossière)	52	93	133	18,0	Clinker activated slag cement C (coarse)
Ciment de laitier au clinker D (mouture moyenne)	76	119	217	17,6	Clinker activated slag cement D (medium)
Ciment de laitier au clinker E (fine mouture)	83	131	226	19,9	Clinker activated slag cement E (fine)
Ciment de laitier sursulfaté F ..	70	264	423	29,2	Supersulphated slag cement F
Ciment sulfo-pouzzolanique H ..	57	92	145	18,3	Sulpho-pozzolana cement H
Ciment de laitier à base de cendre de lignite I	65	113	214	15,1	Slag cement with lignite ash I

(1) Résistance à la traction du béton par la méthode de fendage. (1) The tensile strength of the concrete was determined by the splitting method.

TABLEAU N° 40

TABLE 40

ESSAIS DE GEL ET DE DEGEL
FREEZING AND THAWING TESTS

Nature du ciment Nature of the cement	Portland A 250/315 <i>Portland A</i> 250/315			Portland B 250/315 <i>Portland B</i> 250/315			Ciment de laitier au clinker C (mouture grossière) <i>Clinker activated slag cement C (coarse)</i>		
	W (kg)	E (kg/cm ²) (× 10 ⁻⁴)	Pc (%)	W (kg)	E (kg/cm ²) (× 10 ⁻⁴)	Pc (%)	W (kg)	E (kg/cm ²) (× 10 ⁻⁴)	Pc (%)
0	7,16	37,0	100	7,12	35,3	100	7,13	33,9	100
1	7,17	34,7	93,8	7,13	35,0	99,2	7,13	30,2	89,2
5	7,17	25,4	68,7	7,12	33,7	95,5	7,13	28,2	83,2
15	7,18	24,9	67,4	7,09	32,4	91,8	7,11	27,6	81,5
19	7,17	24,7	66,8	7,07	30,4	86,2			
31	6,94	22,9	61,9	6,87	29,7	84,1	7,02	27,3	80,7
53	5,79	17,6	47,6	6,64	27,3	77,3	6,92	26,1	77,0
60	5,43	13,1	35,4	6,51	26,6	75,4	6,91	26,6	78,5
85				6,24	21,5	60,9	6,75	25,5	75,2
109				6,03	20,5	58,1	6,66	25,2	74,3
155				5,63	17,2	48,7	6,52	19,2	56,7
183				5,38	15,0	42,5	6,17	13,5	39,9
190									
203									

Cycles	Ciment de laitier au clinker D (mouture moyenne) <i>Clinker activated slag cement D (medium)</i>			Ciment de laitier au clinker E (fine mouture) <i>Clinker activated slag cement E (fine)</i>			Ciment de laitier sursulfaté F <i>Supersulphated cement F</i>		
	W	E	Pc	W	E	Pc	W	E	Pc
0	7,19	35,5	100	7,21	37,3	100	7,15	37,0	100
1	7,19	34,1	96,1	7,21	35,2	94,3	7,15	37,0	97,3
5	7,19	31,6	89,1	7,20	33,3	89,3	7,10	34,3	92,8
15	7,18	30,5	85,9	7,19	32,9	88,2	6,72	25,4	68,7
19	7,17	30,0	84,5	7,19	32,6	87,4	6,64	26,0	70,3
31	7,14	28,9	81,4	7,17	31,2	83,7	6,54	21,6	58,3
53	7,11	25,9	73,0	7,11	26,5	71,2	6,32	21,6	58,3
60	7,09	24,8	69,8	7,10	25,4	68,2	6,25	21,7	58,7
85	7,02	25,4	71,6	7,06	24,9	66,7	5,72	19,1	51,7
109	6,99	25,6	72,1						
155	6,91	23,6	66,5	6,96	23,2	62,2			
183	6,83	22,1	62,2	6,93	21,8	58,4			
190	6,82	21,0	59,2	6,92	20,1	53,8			
203				6,92	17,0	45,6			

TABLEAU N° 40 (suite)

TABLE 40 (continuation)

ESSAIS DE GEL ET DE DEGEL
FREEZING AND THAWING TESTS

Cycles	Ciment sulfo-pouzzolanique H <i>Sulpho-pozzolana cement H</i>			Ciment de laitier à base de centre de lignite I <i>Slag cement with lignite ash I</i>		
	W	E	Pe	W	E	Pc
0	7,01	30,6	100	7,15	34,4	100
1	7,02	26,4	86,3	7,15	30,9	89,8
5	7,04	26,1	85,3	7,17	27,9	81,1
15	6,85	24,9	81,4	7,11	26,8	77,8
19	6,61	18,2	59,5	7,10	25,9	75,3
31				7,02	26,0	75,6
53				6,82	24,1	70,1
60				6,78	23,8	69,2
85				6,68	23,4	68,1
109				6,62	20,3	59,0

TABLE 41 (continuation)

CHARACTERISTICS OF THE CEMENT

TABLEAU N° 41 (suite)

CARACTERISTIQUES DES CIMENTS

Nature du ciment	Portland n° 1 250/315 à haute teneur en silice	Portland n° 2 250/315 « prise mer »	Portland 3 250/315	Ciment de laitier sursulfaté	Ciment de laitier au clinker	Nature of the cement
	Portland 1 250/315 high silica	Portland 2 250/315 «sea-water »	Portland 3 250/315	Supersulphated slag cement	Clinker activated slag cement	
Poids spécifique	3,14	3,06	3,14	2,89	3,00	Specific weight
Analyse chimique % :						Chemical analysis % :
SiO ₂	24,56	23,02	21,23	24,77	29,67	SiO ₂
Al ₂ O ₃	2,81	4,08	5,32	12,63	11,49	Al ₂ O ₃
Fe ₂ O ₃	1,13	4,64	3,08	1,71	1,71	Fe ₂ O ₃
CaO	66,35	60,17	64,03	44,38	52,00	CaO
MgO	1,71	1,58	1,74	3,32	3,45	MgO
SO ₃	1,67	1,68	1,94	9,97	0,49	SO ₃
(Chaux libre)	(1,28)	(1,30)	(1,81)			(free lime)
Perte au feu	1,40	1,91	1,50	1,39	0,22	Loss on ignition
Résidus insolubles	0,36	2,82	0,73	1,37	0,35	Insoluble residue
Total	99,99	99,90	99,57	99,54	99,38	Total
Composition minéralogique % :						Mineralogical composition % :
C ³ S	52,7	25,7	46,1			C ³ S
C ² S	30,8	46,7	26,2			C ² S
C ³ A	5,5	2,9	8,9			C ³ A
C ⁴ AF	3,4	14,1	9,4			C ⁴ AF

TABLEAU N° 42
RESISTANCE A LA FLEXION ET A LA COMPRESSION DU MORTIER
BENDING STRENGTH AND COMPRESSIVE STRENGTH OF MORTAR

Nature du ciment	Ecoulement mm <i>Flow</i>	Résistance à la flexion kg/cm ² <i>Bending strength</i>						Résistance à la compression kg/cm ² <i>Compressive strength</i>						Nature of the cement
		jours		jours		jours		jours		jours		jours		
		3	7	3	7	3	7	3	7	3	7	3	7	
Portland n° 1 250/315 à haute teneur en silice	140	27	36	48	130	180	304	Portland cement No. 1 250/315 high silica content						
Portland n° 2 250/315 « prise mer »	130	35	44	60	154	230	353	Portland cement No. 2 250/315 « sea-water »						
Portland n° 3 250/315	145	34	48	57	137	215	316	Portland cement No. 3 250/315						
Ciment de laitier sursulfaté 4	166	43	68	82	192	351	508	Supersulphated slag cement 4						
Ciment de laitier au clinker 5	177	28	42	56	128	210	301	Clinker activated slag cement 5						
Température = 19 °C		Humidité = 87 %												
Temperature = 19° C		Relative humidity = 87 %												

a) Eprouvettes : 4 × 4 × 16 cm prismes
 b) Sable : Quartz naturel (grains ronds, SiO₂ 96 %)
 Dimensions des grains : Fin : 0,105 — 0,294 mm 1 part
 Moyen : 0,294 — 0,590 mm 2 parts
 Grossier : 0,590 — 1,19 mm 7 parts
 c) Composition du mortier : Ciment 1 — Sable : 3 — E/C 0,5 ou C/E 2,00
 a) Specimens : 4 × 4 × 16 cm prisms
 b) Sand : Natural quartz sand (rounded grains, SiO₂ 96 %)
 Particle sizes : Fine : 0.105 — 0.294 mm 1 part
 Medium : 0.294 — 0.590 mm 2 parts
 Coarse : 0.590 — 1.19 mm 7 parts
 c) Composition of mortar : Cement 1 — Sand 3 — W/C 0.5 or C/W 2.00

TABLEAU N° 43 TABLE 43

**RESISTANCE A LA COMPRESSION DU BETON
COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE**

a) Agregats : a) Aggregate :

	S.G.	Analyse de la dimension des grains <i>Grading</i>										Modulus of fineness			
		Dimension des mailles en mm %					Dimension des mailles en cm								
		<i>Mesh opening in mm %</i>					<i>Mesh opening in cm</i>								
Sable région de Sagami-gawa	2,60	0,15	0,3	0,6	1,2	2,5	5,00	2	15	45	73	89	100	2,79	Sand from Sagami-gawa district
Gravier région de Sagami-gawa	2,63		15	10	20	25		0	30	70	100		7,00	Gravel from Sagami-gawa district	

TABLEAU N° 44

TABLE 44

b) *Composition du béton*

b) *Composition of the concrete*

MELANGE DE BASE POUR 1 m³ DE BETON
POUR DIFFERENTS E/C (kg)

BASIC MIX FOR 1 m³ CONCRETE FOR DIFFERENT W/C RATIOS (kg)

E/C	Ciment	Eau	Sable	Gravier	Rapport	Addition
W/C	Cement	Water	Sand	Gravel	Ratio	Admixture
0,50	328	164	780	1,157	1,48	
0,625	266	166	848	1,136	1,33	
0,80	220	176	902	1,090	1,21	CaCl ² 1 %

TABLEAU N° 45
 TABLE 45
 c) Résistance à la compression c) Compressive strength
 EPROUVETTE : CYLINDRE 10 × 20 cm. SPECIMEN : CYLINDER 10 × 20 cm..

Nature du ciment (+) Nature of the Cement (+)	C/E = 2,00 C/W = 2,00				C/E = 1,60 C/W = 1,60				C/E = 1,25 C/W = 1,25			
	Retrait cm Shrinkage	Air occlus % Entrained air %	Résistance kg/cm ² Strength kg/cm ²		Retrait cm Shrinkage	Air occlus % Entrained air %	Résistance kg/cm ² Strength kg/cm ²		Retrait cm Shrinkage	Air occlus % Entrained air %	Résistance kg/cm ² Strength kg/cm ²	
			jours days	jours days			jours days	jours days			jours days	jours days
1	8,5	1,6	127	228	9,0	2,4	81	124	4,5	2,8	33	61
2	6,5	2,1	155	286	6,5	2,8	83	159	2,0	3,7	31	68
3	5,0	2,9	138	256	3,5	3,4	77	147	1,0	3,7	41	71
4	14,5	0,7	218	404	12,0	1,1	79	312	8,0	1,5	140	172
5	15,0	1,5	125	203	13,0	1,9	76	135	15,0	2,2	37	81

(+) 1 = Ciment Portland n° 1 250/315 à haute teneur en silice. (+) 1 = Portland cement n° 1 250/315 with high silica content.
 2 = Ciment Portland n° 2 250/315 « prise mer ». 2 = Portland cement n° 2 250/315 « sea-water ».
 3 = Ciment Portland n° 3 250/315. 3 = Portland cement n° 3 250/315.
 4 = Ciment de laitier sursulfaté. 4 = Supersulphated slag cement.
 5 = Ciment de laitier au clinker. 5 = Clinker activated slag cement.

TABLEAU N° 46

ESSAIS DE GEL ET DE DEGEL

W = Poids de l'éprouvette (kg).
 W_r = Poids relatif (%).
 E = Module dynamique d'élasticité (kg/cm² × 10⁴).
 P_c = Module relatif d'élasticité (%).
 Le module relatif d'élasticité (P_c) en % est obtenu en partant du témoin représentant P_c = 100 %.

Ex. $\frac{35,8}{26,7 \times 100} = 74,6$ P_c = % de qualité

TABLE 46

FREEZING AND THAWING TESTS

W = Weight of specimen (kg).
 W_r = Relative weight (%).
 E = Dynamic modulus of elasticity (kg/cm² × 10⁴).
 P_c = Relative modulus of elasticity (%).
 The relative modulus of elasticity (P_c) expressed as a percentage is obtained in relation to the reference specimen representing P_c = 100 %.

Ex. $\frac{35,8}{26,7 \times 100} = 74,6$ P_c = % qualitative

A — Ciment Portland n° 1 250/315 à haute teneur en silice A — Portland cement No. 1 250/315 with high silica content

Cycles	E		P _c		W		W _r		E		P _c		W		W _r	
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
0	35,8	28,6	100	100	7,18	7,01	100	100	23,7	100	100	100	7,04	100	100	100
1	26,7	18,6	74,6	65	7,19	7,02	100	100,1	12,2	51,5	7,05	100,2	7,05	100,2	100,2	100,2
6	4,8	4,4	13,4	15,4	7,22	7,03	100,5	100,1	3,2	13,5	7,08	100,6	7,08	100,6	100,6	100,6

B — Ciment Portland n° 2 250/315 « prise mer »

Cycles	E		P _c		W		W _r		E		P _c		W		W _r	
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
0	33,9	29,8	100	100	7,18	7,05	100	100	21,5	100	100	100	6,85	100	100	100
1	32,5	26,7	95,9	89,6	7,2	7,06	100,2	100,2	18,5	86,1	6,93	100,2	6,93	100,2	100,2	100,2
6	24,8	12,2	73	41	7,21	7,07	100,4	100,4	7,5	31,9	6,93	101,2	6,93	101,2	101,2	101,2
13	12,8	2,8	37,8	9,4	7,20	7,08	100,3	100,4	1,5	7	6,94	101,3	6,94	101,3	101,3	101,3
17	9,4	2,8	27,7	9,4	7,21	7,08	100,4	100,4	1,5	7	6,94	101,3	6,94	101,3	101,3	101,3

B — Portland cement No. 2 250/315 « sea-water »

TABLEAU N° 46 (suite)

TABLE 46 (continuation)

ESSAIS DE GEL ET DE DEGEL

FREEZING AND THAWING TESTS

C — Ciment Portland n° 3 250/315

C — Portland cement No. 3 250/315

Cycles	E		Pc		W		Wr		E		Pc		W		Wr	
	(1) C/E = 2,00		(1) C/W = 2,00		(2) C/E = 1,6		(2) C/W = 1,6		(3) C/E = 1,25		(3) C/W = 1,25					
0	33,5	100	7,11	100	28,5	100	7,02	100	23,3	100	6,95	100				
1	31,5	94,4	7,12	100,1	25,8	89,9	7,03	100,1	21,2	91	6,98	100,4				
6	28,3	84,5	7,13	100,3	17,5	61,4	7,04	100,3	17,8	76,4	6,99	100,5				
13	22,4	66,9	7,12	100,2	8,4	29,5	7,04	100,3	13,3	57,1	6,98	100,4				
17	17,4	52	7,12	100,2	2,9	10,2	7,04	100,3	1,7	7,3	6,98	100,4				

D — Ciment de laitier sur-sulfaté 4

D — Supersulphated slag cement 4

Cycles	E		Pc		W		Wr		E		Pc		W		Wr	
	(1) C/E = 2,00		(1) C/W = 2,00		(2) C/E = 1,6		(2) C/W = 1,6		(3) C/E = 1,25		(3) C/W = 1,25					
0	33,7	100	7,28	100	28,8	100	6,96	100	19,3	100	6,67	100				
1	31,9	94,6	7,24	99,4	26,2	91	6,91	99,2	9,9	51,3	6,59	98,8				
9	19,8	58,8	6,77	92,5	11,2	38,9	7,08	101,6	1,8	9,3	6,24	93,1				
16	12,5	37,1	6,91	94,7	4,8	16,7	6,58	94,2	1,5	7,8	6,06	90				

E — Ciment de laitier au clinker 5

E — Clinker activated slag cement 5

Cycles	E		Pc		W		Wr		E		Pc		W		Wr	
	(1) C/E = 2,00		(1) C/W = 2,00		(2) C/E = 1,6		(2) C/W = 1,6		(3) C/E = 1,25		(3) C/W = 1,25					
0	32,9	100	7,19	100	28,1	100	7,09	100	22	100	6,865	100				
1	29	88,2	7,175	99,7	20,2	71,9	7,07	99,7	13,3	60,5	6,875	100,1				
9	13,5	41	7,18	99,8	4,3	15,3	7,05	99,4	4	18	6,885	100,2				
16	8	24,3	7,16	99,5	2,5	8,9	7,07	99,7								

C. I. B.
4, rue du Bouloi
PARIS (1^{er})

Copyright © ICOLD - CIGB

Archives informatisées en ligne  *Computerized Archives on line*

*The General Secretary / Le Secrétaire Général :
André Bergeret - 2004*



**International Commission on Large Dams
Commission Internationale des Grands Barrages
151 Bd Haussmann -PARIS -75008**
<http://www.icold-cigb.net> ; <http://www.icold-cigb.org>