

***CEMENTS FOR CONCRETE
FOR LARGE DAMS***

**CIMENTS UTILISÉS
POUR LE BÉTON
DES GRANDS BARRAGES**



*Report prepared by Jukka Vuorinen (Helsinki) in October 1978.
updated in October 1981.*

*Rapport rédigé par Jukka Vuorinen (Helsinki) en octobre 1978.
mis à jour en octobre 1981.*

***CEMENTS FOR CONCRETE
FOR LARGE DAMS***

**CIMENTS UTILISÉS
POUR LE BÉTON
DES GRANDS BARRAGES**



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.

SOMMAIRE

	Page
1. INTRODUCTION	4
2. CLASSIFICATION DES CIMENTS SELON LEUR COMPOSITION.....	6
3. CARACTÉRISTIQUES DU BÉTON EN FONCTION DU CIMENT.....	14
3.1 Généralités.....	14
3.2 Influence du ciment sur la maniabilité du béton frais.....	18
3.3 Evolution de la résistance.....	18
3.4 Elévation de la température due à la chaleur d'hydratation du ciment ..	20
3.5 Relation entre l'évolution de la résistance et un taux initial élevé d'échauf- fement pour différents types de ciment.....	22
3.6 Risque de fissuration d'un béton.....	24
3.7 Sensibilité aux basses températures.....	28
4. INFLUENCE DU TYPE DE CIMENT SUR LA PÉRENNITÉ DU BÉTON .	30
4.1 Généralités.....	30
4.2 Résistance du ciment au lessivage.....	32
4.3 Résistance du ciment aux agressions chimiques.....	32
4.4 Composition du ciment et réactions alcali-granulat.....	34
5. NOTES SUR LES DOMAINES D'UTILISATION DE DIVERS CIMENTS ..	36
5.1 Généralités.....	36
5.2 Utilisation des ciments à faible chaleur d'hydratation.....	38
5.3 Ciments pour climats chauds ou froids.....	38
6. RÉSUMÉ.....	40
7. BIBLIOGRAPHIE.....	44
ANNEXE I.....	48
Note sur l'utilisation des ciments Portland à faible chaleur d'hydratation en Suède.	
ANNEXE II.....	58
Note sur les ciments résistant aux sulfates et sur l'élimination de la réaction alcali- granulat.	

CONTENTS

	Page
1. INTRODUCTION	5
2. CLASSIFICATION OF CEMENTS WITH REGARD TO COMPOSITION ...	7
3. MAIN PROPERTIES OF CONCRETE AS INFLUENCED BY TYPE OF CE- MENT	15
3.1 General	15
3.2 Effects on workability of fresh concrete	19
3.3 Strength development	19
3.4 Temperature rise due to heat of cement hydration	21
3.5 Interdependence of strength development and early rate of heat evolution for different types of cement	23
3.6 Tendency for cracking of concrete	25
3.7 Sensitivity to effects of low temperature	29
4. INFLUENCE OF CEMENT TYPE ON DURABILITY OF CONCRETE	31
4.1 General	31
4.2 Resistance of cement to leaching	33
4.3 Resistance of cement to chemical attack	33
4.4 Cement composition and alkali-aggregate reaction	35
5. NOTES ON FIELDS OF USE OF DIFFERENT TYPES OF CEMENT	37
5.1 General	37
5.2 Use of low-heat cements	39
5.3 Cements for use in hot or cold climates	39
6. SUMMARY	41
7. REFERENCES	44
APPENDIX I	49
Note on the use of Low Heat Portland cements in Sweden.	
APPENDIX II	59
Notes on cements resistant to sulphates and for the avoidance of an alkali- aggregate reaction.	

1. INTRODUCTION

En 1972; un rapport intitulé *Ciments pour Ouvrages Hydrauliques* [réf. 1], établi par le Groupe de Travail sur le Béton du Comité Suédois, fut diffusé auprès des membres du Comité des Matériaux pour Barrages. Au cours de la réunion du Sous-Comité des Matériaux pour Barrages en Bétons (Madrid, juin 1973), il a été reconnu que la question des ciments spéciaux présentait actuellement de l'intérêt, et ce sujet fut ainsi inscrit au programme de travail du sous-comité. Le représentant finlandais, M. J. Vuorinen, devait rédiger un rapport sous le titre *Ciments spéciaux pour le béton des grands barrages* en collaboration avec ses collègues scandinaves.

Ce rapport a deux buts :

- orienter le choix des ciments à utiliser selon chaque cas,
- présenter et commenter les différentes méthodes utilisées pour apprécier la qualité des ciments du point de vue de leur utilisation et de leurs performances dans le béton des grands barrages.

Les ciments spéciaux pour le béton des barrages ont déjà fait l'objet de travaux au sein de la CIGB, notamment au deuxième congrès à Washington (Question 3 : « Ciments Spéciaux », 1936) et au troisième congrès de Stockholm (Question 11 : « Enseignements des essais et des applications pratiques des ciments spéciaux utilisés dans les grands barrages », 1948). En outre, des sujets voisins furent discutés au quatrième congrès de New Delhi (Question 15 : « Béton pour grands barrages », 1951) et au sixième congrès de New York (Question 23 : « Utilisation dans le béton des barrages des adjuvants et pouzzolanes et influence des sables plus fins », 1958).

Les progrès intervenus depuis dans la technologie des ciments et dans les méthodes de conception et de réalisation des barrages conduisent à étudier l'utilisation des nouveaux ciments à la lumière des techniques actuelles de l'ingénieur barragiste.

Grâce aux progrès réalisés dans les domaines de la recherche et de la fabrication, on dispose actuellement de nouveaux types de ciments, notamment des ciments à constituants secondaires. En outre, on a pu tirer des conclusions des expériences faites avec les premiers ciments spéciaux. De plus, des progrès sont intervenus dans les moyens d'essais, permettant de saisir les caractéristiques des différents ciments et d'apprécier leur comportement dans la pratique. Il est ainsi possible de choisir un ciment en fonction de sa destination.

Cependant, il ne faut pas oublier que le but étant la réalisation d'un ouvrage performant, le ciment utilisé n'est qu'un paramètre que l'on peut faire varier pour atteindre ce but. Parmi les autres paramètres on peut citer :

- l'origine des granulats;
- les adjuvants éventuels;
- le refroidissement du béton (avant ou après sa mise en place);
- la distance entre joints;
- l'épaisseur des levées;
- le temps séparant deux levées.

1. INTRODUCTION

In 1972 a report entitled *Cements for Hydraulic Structures* [ref. 1], prepared by the Working Group on Concrete of the Swedish National Committee of ICOLD, was distributed to the members of the Committee on Materials for Large Dams. At the Madrid meeting in June 1973 of the Sub-Committee on Concrete of the ICOLD Committee on Materials for Dams it was agreed that the topic of special cements was of current interest and therefore it was included in the programme of further work of the Sub-Committee. The Finnish representative, Dr. J. Vuorinen, was then asked to prepare a report on *Special Cements for Concrete for Large Dams*, in cooperation with his Scandinavian colleagues.

This report has two purposes :

- to provide guidance for the selection of a suitable type of cement for a specific practical application, and
- to present and discuss various methods suitable for the assessment of different cements from the point of view of the applicability and performance in concrete for large dams.

The question of special cements for concrete for large dams is not new in the working program of ICOLD. It was comprehensively discussed at the Second Congress of ICOLD in Washington, D.C., in 1936 (Question 3 : "Special cements") and treated also at the Third Congress in Stockholm in 1948 (Question 11 : "Experiences arising from the testing and the actual use of special cements in large dams"). Related subjects were discussed at the Fourth Congress in New Delhi in 1951 (Question 15 : "Concrete for large dams") and at the Sixth Congress in New York in 1958 (Question 23 : "Use of admixtures and pozzolanic materials in concrete for dams and the influence of the finer sand particles").

Since the occasions mentioned above, new developments in the technology of cements and in design and construction practices make it desirable to examine the question as to the use of cements now available for concrete for large dams against the background of the present situation.

As a result of the advances in cement research and manufacture, new types of cement – particularly blended ones – have become available and experiences from the use of earlier special cements have been gathered. At the same time the methods of testing cement have also developed, so that the characteristic properties of different cements with regard to their performance in concrete can be portrayed and assessed using the results of suitable tests. Thus it has become possible to select the type of cement which should be preferred for any specific application.

It should be kept in mind, however, that a satisfactory concrete structure is the ultimate objective and the cement is only one factor among many others which may be varied to correspond to the requirements set for the structure itself. Other factors may include :

- the source of aggregate;
- the type of admixture (if any);
- the precooling and postcooling of concrete;
- the spacing of construction and contraction joints;
- the lift thickness;
- the time interval between subsequent lifts.

Ainsi, le choix du ciment à utiliser est à fixer en tenant compte des caractéristiques du projet et de la méthode de construction pour que le projet à l'étude réponde le plus économiquement possible aux exigences techniques. Dans ces conditions, il est évident que le choix du ciment (type, source selon disponibilité) doit intervenir dès les études préliminaires, tout comme dans le cas d'un barrage en remblai, dont la conception est évidemment tributaire des matériaux disponibles sur le site. On doit noter que ce choix anticipé du fabricant pourra être possible seulement si le Maître de l'Ouvrage fournit le ciment.

Pour résumer ce qui précède, on peut citer un passage du rapport de J.L. Savage, *Special Cements for Mass Concrete*, rédigé en 1936 [réf. 45, p. 4] et qui reste très actuel :

« On ne peut établir des règles simples pour le meilleur choix de ciment à utiliser pour les ouvrages en béton massif. Chaque projet est caractérisé par ses propres paramètres de conception, de construction et d'économie. L'ingénieur dispose de données fournies par un grand nombre d'études de laboratoire, de procédures mathématiques d'analyse des flux de températures dans le béton massif, et de résultats pratiques de chantier concernant les différents types de ciment. L'analyse complète d'un projet doit déboucher sur un bon équilibre entre les éléments ci-dessus, les contraintes de réalisation, et les problèmes économiques de la fabrication des ciments, la production des matériaux et la manutention sur le chantier ».

Les principes énoncés ci-dessus ne s'opposent pas à une mise au point concernant les caractéristiques des différents types de ciments actuellement disponibles. Au contraire, il semble très important d'étudier plus complètement les éléments à la fois d'ordre technique et économique qui interviennent dans le choix d'un ciment. Les informations contenues dans le présent rapport visent à donner des lignes directrices pour l'étude des différents ciments et des éléments pour élaborer un bon choix du point de vue technique. Cette étude des ciments ayant été étendue pour couvrir tous les types utilisés en construction, le mot « spéciaux » a été supprimé dans le titre.

Comme il n'est pas possible de donner tous les détails dans ce rapport, une bibliographie assez complète est annexée et le lecteur pourra y trouver les renseignements supplémentaires dont il aura sans doute besoin dans de nombreux cas.

2. CLASSIFICATION DES CIMENTS SELON LEUR COMPOSITION

Le tableau 1 correspond à une classification des ciments essentiellement selon leur composition. Il faut noter que la frontière entre les différents types est parfois floue. Ce travail de classification est rendu plus difficile par le fait que chaque pays établit ses propres normes qui ne coïncident pas forcément avec celles des autres pays [réf. 10]. Ainsi, il n'est pas possible de citer les valeurs exactes des teneurs en différents composants.

Therefore the choice of the type of cement has to be considered together with the design features and the intended construction practice so that the dam project under consideration may be realized to satisfy the technical requirements simultaneously with the best economy. From the above it follows that already at the pre-design stage of a dam project the decision should be made regarding the cement type and brand (of those locally and/or reasonably available) to be used for making concrete as needed. In this respect the situation could be compared to that encountered in the design of an earth dam, in which it is considered obvious that the design shall be based on the characteristics of the materials locally available. A preselection of the brand of cement may not be feasible unless the owner is arranging the supply of the cement for construction of the project.

For summing up the above, it seems still timely in this connection to quote a passage from the report of J.L. Savage on *Special Cements for Mass Concrete* from the year 1936 [ref. 45, p. 4]:

“No well-established or fixed rules can be given for determining the most suitable type of cement to be used for mass concrete structures. Each job is characterized by its individual set of controlling factors as to design, construction, and economy. The designer now has at his disposal data and information from extensive laboratory investigations of cements, well established mathematical processes for analyzing temperature movements in mass concrete and the results of experience with various types of cements on typical jobs. The complete analysis of any particular job must balance the above considerations with problems of construction and the economic aspects of cement manufacture, material production and job manipulation”.

The principles presented above do not render unnecessary a review of the characteristics of the types of cement now available for the construction of dams. On the contrary, it seems essential that both the technical and the economical aspects connected with the selection of cement type be thoroughly examined. The information contained in the present report is intended to provide guidance for the assessment of different cements and to discuss the technical side of the problem of selecting the cement type preferable for the application under consideration. As the review of cement types has been extended to cover all types of cements used for construction purposes, it has been considered appropriate to omit the word “special” from the title of this report.

It is not possible to cover all details of the present subject in a concise report, and therefore a fairly extensive list of references is appended and offered as giving sources of more information as undoubtedly in many cases will be found desirable.

2. CLASSIFICATION OF CEMENTS WITH REGARD TO COMPOSITION

To indicate the variety of cement types now manufactured for construction purposes Table 1 has been compiled in which the types of cement have been classified mainly according to their composition, although distinct boundaries between adjacent types do not always exist. The compilation of such a table has been rendered more difficult by the fact that practically every country has its own national cement standards or corresponding specifications which might differ from those used in other countries [ref. 10]. Therefore it has not been possible to give precise figures for the composition of any cement type listed.

Il faut noter également que pour les ciments d'un même type, la composition et les caractéristiques peuvent varier d'un pays à l'autre, ou à l'intérieur d'un même pays. Souvent, les contraintes liées à un nouveau procédé de fabrication peuvent influencer la mise au point de nouveaux ciments. Par exemple, le ciment Portland ordinaire se rapproche beaucoup plus que par le passé des ciments à prise rapide, généralement par suite d'un broyage plus fin. En outre, la qualité d'un ciment peut varier dans le temps selon la nature des matières premières utilisées ou selon le contrôle de qualité pratiqué par le fabricant.

En ce qui concerne le regroupement des ciments et leur description, la Recommandation ISO R 597/1967 [réf. 26] est appliquée dans toute la mesure du possible. Afin de permettre des recoupements et d'indiquer la composition-type et les propriétés approximatives de chaque ciment, ce tableau fait référence aux normes britanniques, ASTM et AFNOR. A noter que souvent une norme peut faire figurer le même ciment dans deux ou plusieurs catégories de résistance, mais il n'a pas été tenu compte de cette possibilité dans le tableau 1.

Les ciments à air occlus ne figurent pas, ce phénomène pouvant être obtenu à l'aide d'entraîneur d'air.

Les ciments pour la maçonnerie, bien que n'étant pas destinés au béton massif, figurent dans le tableau 1, selon la règle établie dans les manuels d'ingénieurs et autres publications [par exemple, réf. 8, 9 et 36].

En ce qui concerne les ciments à pouzzolanes ou à laitier, on peut obtenir le résultat recherché par deux méthodes distinctes :

- le mélange du matériau broyé d'apport (laitier, pouzzolanes) avec un ciment Portland ordinaire,
- le broyage de ces matériaux avec le clinker Portland pour les types grossiers de cendres volantes.

Cependant comme les matériaux de résidus présentent des variations de qualité bien plus grandes que celles du ciment, l'ajout de tels ingrédients sur le chantier peut accroître les variations dans la qualité du béton.

A ce sujet, on pourra utilement consulter le *Bulletin CIGB n° 22* [réf. 24] établi par le Comité des Matériaux pour Barrages, qui traite de l'utilisation des pouzzolanes et des laitiers dans les bétons de barrage. En particulier, la première méthode indiquée ci-dessus semble présenter des avantages lorsque les ingrédients (par exemple cendres volantes) sont disponibles. Un avantage supplémentaire concerne la possibilité de pouvoir faire varier la teneur en laitiers ou en pouzzolanes selon les besoins du chantier. Il faut noter également que le dosage séparé des ingrédients rend nécessaire un contrôle de leur qualité, mais on dispose ainsi de moyens de contrôle de la qualité du béton.

Le nombre des différents ciments disponibles dans un pays peut être restreint. Il s'agit tout d'abord des types spéciaux, pour lesquels le marché limité ne permet pas une fabrication rentable. En outre, les matières premières peuvent faire défaut (nature, composition). On peut remarquer que dans la plupart des pays, le ciment Portland ordinaire correspond au gros de la production nationale (de l'ordre de 90 % ou plus), bien que certains pays fabriquent une quantité non négligeable de ciments Portland à constituants secondaires (20 à 50 % de la production totale). La crise de l'énergie

It should be pointed out that cements of a certain type produced in different countries – and also within countries - may differ from each other as to composition and properties. In many cases the requirements of new construction procedures have also had an influence on the development of cement types. As an example of such influence it can be noted that present-day ordinary Portland cement very often is closer to rapid-hardening type than in the past, generally caused by finer grinding. In addition, the uniformity of cement from a specific source may vary depending on the nature of the raw materials as well as on the degree of quality control exercised by the manufacturer.

With regard to the grouping of cement types and the denominations used, the ISO (International Organization for Standardization) Recommendation R 597/1967 [ref. 26] has been followed as far as possible. For illustrating the classification used and to indicate typical compositions and approximate properties of individual cement types references to British, ASTM (American Society for Testing and Materials) and AFNOR (Association Française de Normalisation) standards have also been included in Table I. It should be noted that in many standards the same type of cement may appear in two or even more strength grades, but no attention has been paid to this in the compilation of the table.

Air-entraining cements have been omitted as separate types, as the same result can be achieved through the use of air-entraining admixtures in concrete.

It should also be noted that although masonry cements are not intended for making mass concrete, they have been included in Table I following the practice in many textbooks and other publications [e.g. refs. 8, 9 and 36].

As regards the cement types containing pozzolana or blastfurnace slag it seems appropriate to note that similar results in concrete properties may be achieved by :

- a separate addition of ground slag or pozzolanic material to a concrete mixture with straight Portland cement,
- the use of a blended cement produced by intergrinding these materials with Portland clinker for coarser types of fly ash.

However, as waste materials have far higher quality variations than cement, site addition may increase variations of concrete properties.

In this connection reference is made to *ICOLD Bulletin No. 22* [ref. 24] prepared by the Committee on Concrete for Large Dams, in which various aspects of utilizing pozzolana and slag in concrete for large dams are treated. In particular, the separate addition of pozzolana or ground slag would seem to offer an interesting alternative to the use of a blended cement when suitable material (e.g. fly ash, sometimes denoted by PFA) is available. Additional advantage would lie in the possibility of varying the percentage of pozzolana or slag to suit local requirements. It is to be noted also that as a consequence of the separate batching of these constituents there is both the need and the possibility of verifying their quality separately from the cement to obtain appropriate control of the quality of concrete.

It should be kept in mind that the actual availability of different cements may in many countries be limited to a few types only. This limitation applies in the first place to the more special types of cement, their small demand being mostly the main reason rendering their manufacture commercially uneconomical. In many cases also the nature and composition of the available raw materials may not be suitable for the manufacture of certain types of cement. It may be mentioned in this connection that in most countries the share of ordinary Portland cement is of the order of 90 percent or even more of the

TABLEAU 1. – CLASSIFICATION DES CIMENTS

Type de ciment	Norme britannique	Norme ASTM	Norme AFNOR	Remarques sur la composition, etc.
A. Ciments Portland sans constituants secondaires				
1. Ciment Portland extra rapide	BS 12 : 1978	C150-80 Type III	P 15-30I CPA HPR P 15-30I	
2. Ciment Portland rapide	BS 12 : 1978	C150-80 Type I	CPA HP-55 R-45 R P 15-30I CPA 35-45-55	
3. Ciment Portland artificiel (CPA)				$C_3A \leq 8\%$, chaleur d'hydratation $H_7 \leq 70$ cal/g $C_3A \leq 3,5$
4. Ciment Portland à chaleur d'hydratation modérée	BS 4027 : 1982	C150-80 Type II	(voir réglementation C.O.P.L.A.)	$C_3A \leq 7\%$, $H_7 \leq 60$ cal/g, $H_{28} \leq 70$ cal/g $C_3 \approx 0$; $C_2S/C_3S = 1,5 \dots 3$
5. Ciment Portland résistant aux sulfates	BS 1370 : 1979	C150-80 Type V		
6. Ciment Portland à faible chaleur d'hydratation	BS 12 : 1978	C150-80 Type IV	P 15-30I CPA blanc (la couleur n'est pas normalisée)	$C_4AP \approx 1\%$ faible alcali
7. Ciment Portland à très faible chaleur d'hydratation	BS 12 : 1978			Pigment (BS 1014 : 1975) 2 ... 10% intégré 0,1 ... 0,4% acide oléique ou stéarique intégré
8. Ciment Portland blanc				
9. Ciment Portland coloré				
10. Ciment Portland hydrophobe				
B. Ciments contenant du laitier de haut fourneau				
1. Ciment Portland de laitier 10-20	BS 146 : 1973	C595-79 Type IS	P 15-30I CPJ (au laitier)	la teneur (%) en laitier est indiquée par des chiffres dans la dénomination du type de ciment
2. Ciment Portland de laitier 20-35	BS 146 : 1973	C595-79 Type IS	P 15-30I CPJ (au laitier)	
3. Ciment Portland de laitier 35-60	BS 146 : 1973	C595-79 Type IS	P 15-30I CHF (en cours)	
4. Ciment Portland de laitier à faible chaleur d'hydratation 60-80	BS 4246 : 1974	C595-79 Type S/MH	P 15-30I CHF	
5. Ciment Portland de laitier à faible chaleur d'hydratation 85	BS 4246 : 1974	C595-79 Type S/LH	P 15-30I CLK	Laitier $> 85\%$ + clinker
6. Ciment sursulfaté	BS 4248 : 1974		P 15-303 CSS (n'est plus fabriquée) P 15-306 CLX (n'est plus fabriquée)	Laitier $> 80\%$ + $CaSO_4 \approx 15\%$ Laitier $> 70\%$, chaux $\leq 30\%$
7. Ciment de laitier à la chaux		C595-76 Type S		

TABLE 1. – CLASSIFICATION OF TYPES OF CEMENTS

Type of Cements	British Standard	ASTM Standard	Norme AFNOR	Remarks on Composition, etc.
A. Portland Cements without Secondary Constituents				
1. Extra-Rapid-Hardening Portland Cement	BS 12 : 1978	C150-80 Type III	P 15-301 CPA HPR P 15-301	
2. Rapid-Hardening Portland Cement	BS 12 : 1978	C150-80 Type I	CPA HP-55 R-45 R P 15-301 CPA 35-45-55	$C_3A \leq 8\%$, Heat of Hydr. $H_7 \leq 70$ cal/g $C_3A \leq 3,5$
3. Ordinary Portland Cement		C150-80 Type II		
4. Moderate-Heat Portland Cement		C150-80 Type V	(voir réglementation C.O.P.-L.A.)	$C_3A \leq 7\%$, $H_7 \leq 60$ cal/g, $H_{28} \leq 70$ cal/g
5. Sulphate-Resisting Portland Cement	BS 4027 : 1980			$C_3S/C_2S = 1,5 \dots 3$ $C_4AF \approx 1\%$, low alkali
6. Low-Heat Portland Cement	BS 1370 : 1979	C150-80 Type IV		
7. Extra-Low-Heat Portland Cement	BS 12 : 1978		P 15-301 CPA blanc (la couleur n'est pas normalisée)	
8. White Portland Cement				
9. Coloured Portland Cement	BS 12 : 1978			Pigment (BS 1014 : 1975) 2 ... 10 % interground 0,1 ... 0,4 % oleic (or stearic) acid interground
10. Hydrophobic Portland Cement				
B. Cements containing Blast furnace Slag				
1. Portland Blast furnace Cement 10-20	BS 146 : 1973	C595-79 Type IS	P 15-301 CPJ (au laitier)	Slag content in percent indicated by figures in denomination of type
2. Portland Blast furnace Cement 20-35	BS 146 : 1973	C595-79 Type IS	P 15-301 CPJ (au laitier)	
3. Portland Blast furnace Cement 35-60	BS 146 : 1973	C595-79 Type IS	P 15-301 CHF (en cours)	
4. Low-Heat Portland Blast furnace 60-80	BS 4246 : 1974	C595-79 Type S/MH	P 15-301 CHF	Slag $> 85\%$ + clinker
5. Low-Heat Portland Blast furnace 85	BS 4246 : 1974	C595-79 Type S/LH	P 15-301 CLK	Slag $> 80\%$ + $CaSO_4 \approx 15\%$
6. Supersulphated Cement	BS 4248 : 1974		P 15-303 CSS (n'est plus fabriquée)	
7. Lime-Slag Cement		C595-76 Type S	P 15-306 CLX (n'est plus fabriquée)	Slag content $\geq 70\%$, lime $\leq 30\%$

TABLEAU 1. (suite)

	C595-79	Type IP	P 15-301 CPI (aux cendres ou aux pouzzolanes)	La teneur (%) en pouzzolanes (cendres volantes) est indiquée par les chiffres
C. Ciments contenant des pouzzolanes				
1. Ciment mixte Portland-pouzzolanes 10-20			P 15-301 CPI (aux cendres ou aux pouzzolanes)	
2. Pouzzolane 20-40		Type P/MH	P 15-301 CPI (aux cendres ou aux pouzzolanes)	
D. Autres Ciments				
1. Ciment fondu	BS 915 : 1972		Ciment fondu (non normalisé)	
2. Ciment à prise contrôlée			Ciment prompt (non normalisé)	
3. Ciment expansif de type K		C845-80		Portl. cl. + ternaire (11CaO, 7Al ₂ O ₃ , CaF ₂)
4. Ciment expansif de type S		C845-80		Anhydr. 4CaO, 3Al ₂ O ₃ , SO ₃ + Portl. cl. CaSO ₄ + chaux
5. Ciments expansifs de types M		C845-80		Portl. cl. (taux élevé en C ₃ A) + CaSO ₄
6. Ciment à maçonner	BS 5224 : 1976	C91-80	P 15-307 CM	Portl. cl. + ciment fondu + CaSO ₄ Teneur en ciment Portland = 40 ... 70 %
7. Ciment naturel			P 15-308 CN	C ₃ S ≈ 0

Note 1 : Les Normes auxquelles on se réfère (britannique, ASTM, AFNOR) sont les dernières connues à la date de cette mise à jour et sont bien entendu sujettes à modifications ultérieures.

Note 2 : Pour obtenir un ciment Portland à chaux d'hydratation modérée, il faut spécifier les exigences chimiques ou physiques.

Note 3 : Se reporter aussi à l'ouvrage « Cements Standards of the World » édité par Cembureau - The European Cement Association, 2, rue Saint-Charles, 75015 Paris. Tel. : 579.28.66.

S'adresser aussi au CERIH (Centre d'Etudes et de Recherches de l'Industrie des Liants Hydrauliques), 23, rue Cronstadt, 75015 Paris.

TABLE I. (suite)

C. Cements containing Pozzolana					
1. Portland-Pozzolana Cement 10-20	C595-79 Type IP	P 15-301 CPI (aux cendres ou aux pouzzolanes)			Pozzolana (e.g. fly ash) content in percent as shown by figures
2. Pozzolan Cement 20-40	C595-79 Type P/MH	P 15-301 CPI (aux cendres ou aux pouzzolanes)			
D. Other Cements					
1. High-Alumina Cement	BS 915 : 1972				
2. Regulated-Set Cement					
3. Expansive Cement Type K	C845-80				
4. Expansive Cement Type S	C845-80				
5. Expansive Cement Type M	C845-80				
6. Masonry Cement	C91-80				
7. Natural Cement	BS 5224 : 1976				

Note 1 : The specifications quoted are the latest available at the time of writing but may be subject to alteration.

Note 2 : Optional chemical or physical requirements must be specified to obtain Moderate-Heat Portland Cement.

Note 3 : See also the book "Cements Standards of the World" published by Cembureau - The European Cement Association, 2, rue Saint-Charles, 75015 Paris. Tel. : 579.28.66.

See also CERILH (Centre d'Etudes et de Recherches de l'Industrie des Liants Hydrauliques), 23, rue Cronstadt, 75015 Paris.

provoque cependant une rapide augmentation du pourcentage de ciments comportant des résidus.

Le choix d'un ciment est souvent fonction de sa composition chimique (ou plutôt de la composition du principal ingrédient), mais plus généralement, c'est l'influence du ciment sur le comportement du béton qui est la préoccupation majeure.

3. CARACTÉRISTIQUES DES BÉTONS EN FONCTION DU CIMENT

3.1. Généralités

Les normes servent à inciter les fabricants de ciment à assurer la régularité des caractéristiques de leur production et leur conformité avec celles résultant d'essais normalisés. Ces essais définissent la résistance mécanique du ciment (et en partie la rapidité de son durcissement), mais en général, ils ne permettent pas d'établir les caractéristiques des bétons en fonction du ciment utilisé.

Cependant, les expériences récentes semblent indiquer un besoin croissant d'essais rapides pour les ciments. Les résultats de ces essais faciliteront également le contrôle du béton, car on pourra faire varier le dosage des constituants pour tenir compte des variations éventuelles des qualités du ciment approvisionné. L'utilisateur de ces essais rapides ne doit pas oublier qu'il n'existe aucune généralisation valable pour l'ensemble des ciments, et que, par conséquent, il faut établir une courbe d'étalonnage pour chaque type.

Il est parfois possible du point de vue technique et économique de faire fabriquer un ciment spécial possédant les caractéristiques voulues, mais le plus souvent, dans la pratique, il ne s'agit pas de déterminer quel serait le meilleur ciment pour le projet, mais plutôt de faire un choix judicieux entre deux, ou éventuellement plusieurs ciments dont on pourra disposer sur le chantier à un prix acceptable. Dans ces conditions, il est plus utile de disposer d'un ensemble d'essais permettant de caractériser le béton, et les essais préconisés par les normes deviennent moins significatifs.

Sans vouloir dénigrer les essais normalisés sur le ciment, qui sont largement utilisés, il est nécessaire de souligner que ces essais ne pourront remplacer ceux qui sont faits sur le béton, qui comprend tous les ingrédients. L'analyse comparative des différents ciments passe nécessairement par des essais sur le béton (à l'exception des problèmes concernant la pérennité chimique des bétons).

Le tableau 2 fait ressortir l'influence du ciment sur les caractéristiques du béton. L'échelle des appréciations des différentes caractéristiques est donnée dans le tableau 3.

Dans les paragraphes suivants, on examine les caractéristiques principales du béton ainsi que certains essais permettant d'apprécier les caractéristiques du ciment selon son influence sur le comportement du béton. Il existe évidemment plusieurs essais différents pour étudier une caractéristique donnée, et leur choix sera influencé autant par les

total production of cement, although in some countries considerable quantities of blended Portland cements (20 to 50 percent of the total) are being produced. The energy crisis causes, however, a rapid increase in the percentage of cements with waste materials.

In certain cases the chemical or rather the main compound composition of cement may be the proper basis for choosing a cement for a specific application. More commonly, however, attention has to be directed to the types of cement with regard to the influence on the properties of concrete.

3. MAIN PROPERTIES OF CONCRETE AS INFLUENCED BY TYPE OF CEMENT

3.1. General

One of the purposes of cement standards or specifications is to guide cement manufacturers in producing cements with controlled properties and to ensure that cement as a product will comply with the requirements set for the results of certain standardized tests. The strength grade of a cement – and partly also the early rate of hardening – is usually shown by the standardized strength tests, but generally speaking the standard tests are not, however, particularly suitable for revealing properties of concrete prepared with different cements.

Nevertheless, experiences gathered during recent years seem to indicate a definite increase in the interest in rapid cement tests. Results of such tests will facilitate also the control of concrete production through the possibility of changing the mix proportions in time to compensate for the changes (e.g. occasional variations) in the properties of cement. It should be noted when using rapid tests, that there is no formula valid for all cements and therefore each specific cement needs its own calibration curves.

In some cases it may be technically and economically feasible to arrange for the special manufacture of a cement having certain desired characteristics, but mostly the problem of testing cement in practice is not to determine the most suitable cement for a specific job, but to make a well-founded choice between two – or perhaps more – cement types and brands obtainable at the site at reasonable cost. Then a set of suitable performance tests on concrete becomes much more significant than the standardized tests according to cement specifications.

Without any intention to undervalue widely employed standardized cement tests it seems necessary to make clear that such tests cannot replace tests on concrete in which all the final ingredients are combined. With the exception of problems concerning the chemical durability of concrete, it is possible only by testing in concrete to assess the relative merits of one type or brand of cement compared with another one.

To indicate how the type of cement is reflected in different properties of concrete Table 2 has been compiled. The expression used to describe the approximate ratings or grades of various characteristics are given in Table 3 in order of merit.

In the following, some of the more important properties of concrete are examined and certain test methods are reviewed by which the characteristics of cement reflected in concrete properties may be assessed. It is quite clear that usually there is a variety of test methods which may be used for studying a certain property of concrete, and the final

TABLEAU 2. – RELATION ENTRE LE TYPE DE CIMENT ET LES CARACTÉRISTIQUES DU BÉTON
(Pour l'échelle des appréciations, voir le tableau 3, page 43)

Type de ciment	Vitesse de durcissement	Résistance initiale	Gain de résistance à 28 jours	Chaleur initiale	Résistance au lessivage	Résistance aux sulfates	Sensibilité aux basses températures	Possibilité d'utilisation pour les barrages en béton
A. Ciments Portland sans constituants secondaires								
1. Ciment Portland extra prompt	très rapide	très élevée	négligeable	très élevée	médiocre	médiocre	nulle	non
2. Ciment Portland rapide	rapide	élevée	léger	élevée	médiocre	médiocre	nulle	non
3. Ciment Portland artificiel (CPA)	moyenne	moyenne	moyen	assez élevée	assez médiocre	assez médiocre	moyenne	utilisable
4. Ciment Portland à chaleur d'hydratation modérée	assez lente	moyenne	moyen	moyenne	moyenne	moyenne	moyenne	bonne
5. Ciment Portland résistant aux sulfates	moyenne	moyenne	moyen	moyenne	bonne	très bonne	sensible	bonne
6. Ciment Portland à faible chaleur d'hydratation	lente	faible	grand	faible	bonne	bonne	sensible	excellente
7. Ciment Portland à très faible chaleur d'hydratation	très lente	très faible	très grand	très faible	bonne	très bonne	très sensible	excellente
8. Ciment Portland blanc	moyenne	moyenne	moyen	moyenne	ass. médiocre	médiocre	moyenne	moyenne
9. Ciment Portland coloré	moyenne	moyenne	moyen	moyenne	ass. mé	médiocre	moyenne	moyenne
10. Ciment Portland hydrophobe	moyenne	moyenne	moyen	moyenne	ass. médiocre	médiocre	moyenne	moyenne
B. Ciments contenant du laitier de haut fourneau								
1. Ciment Portland de laitier 10-20	moyenne	moyenne	moyen	moyenne	ass. médiocre	ass. médiocre	moyenne	moyenne
2. Ciment Portland de laitier 20-35	moyenne	faible	moyen	moyenne	moyenne	moyenne	sensible	bonne
3. Ciment Portland de laitier 35-60	assez lente	faible	grand	faible	bonne	bonne	très sensible	bonne
4. Ciment Portland de laitier 60-80	assez lente	faible	très grand	très faible	très bonne	très bonne	très sensible	excellente
5. Ciment Portland de laitier 85	lente	faible	très grand	très faible	très bonne	très bonne	très sensible	excellente
6. Ciment surulfaté	lente	faible	moyen	faible	bonne	bonne	sensible	excellente
7. Ciment de laitier à la chaux	lente	faible	moyen	faible	bonne	bonne	très sensible	moyenne
C. Ciments contenant des pouzzolanes								
1. Ciment Portland-pouzzolane 10-20	moyenne	moyenne	moyen	moyenne	moyenne	ass. médiocre	moyenne	moyenne
2. Pouzzolane 20-45	assez lente	faible	grand	faible	bonne	moyenne	sensible	bonne
D. Autres ciments								
1. Ciment fondu	très rapide	très élevée	négligeable	très élevée	bonne	très bonne	nulle	non
2. Ciment à prise contrôlée	très rapide	très élevée	moyen	élevée	moyenne	médiocre	nulle	non
3. Ciment expansif de type K	moyenne	moyenne	moyen	moyenne	moyenne	moyenne	sensible	éventuel
4. Ciment expansif de type S	moyenne	moyenne	moyen	moyenne	médiocre	médiocre	sensible	éventuel
5. Ciment expansif de type M	moyenne	moyenne	moyen	assez élevée	médiocre	médiocre	sensible	éventuel
6. Ciment à maçonner	assez lente	moyenne	moyen	assez élevée	médiocre	médiocre	sensible	non
7. Ciment naturel	assez lente	moyenne	moyen	moyenne	ass. médiocre	médiocre	sensible	moyenne

TABLE 2. - RELATIONSHIP BETWEEN CEMENT TYPE AND CHARACTERISTICS OF CONCRETE
 (For relative order of approximate ratings used refer to Table 3, page 43)

Type of cements	Rate of hardening	Early strength	Strength gain after 28 days	Early rate of heat evolution	Resistance to leaching	Resistance to sulphate attack	Sensitivity to low temperature	Applicability for massive dams
A. Portland Cements without Secondary Constituents								
1. Extra-Rapid-Hardening Portland Cement	very rapid	very high	negligible	very high	poor	poor	insensitive	unsuited
2. Rapid-Hardening Portland Cement	rapid	high	small	high	poor	poor	insensitive	unsuited
3. Ordinary Portland Cement	moderate	moderate	moderate	fairly high	fairly poor	fairly poor	moderate	usable
4. Moderate-Heat Portland Cement	fairly slow	moderate	moderate	moderate	moderate	moderate	moderate	appropriate
5. Sulphate-Resisting Portland Cement	moderate	moderate	moderate	moderate	good	very good	sensitive	appropriate
6. Low-Heat Portland Cement	slow	low	considerable	low	good	good	sensitive	well-suited
7. Extra-Low-Heat Portland Cement	very slow	very low	great	very low	good	very good	very sensitive	well-suited
8. White Portland Cement	moderate	moderate	moderate	moderate	fairly poor	poor	moderate	usable
9. Coloured Portland Cement	moderate	moderate	moderate	moderate	fairly poor	poor	moderate	usable
10. Hydrophobic Portland Cement	moderate	moderate	moderate	moderate	fairly poor	poor	moderate	usable
B. Cements containing Blast furnace Slag								
1. Portland-Blast furnace Cement 10-20	moderate	moderate	moderate	moderate	fairly poor	fairly poor	moderate	usable
2. Portland-Blast furnace Cement 20-35	moderate	low	moderate	moderate	moderate	moderate	sensitive	appropriate
3. Portland-Blast furnace Cement 35-60	fairly slow	low	considerable	low	good	good	very sensitive	appropriate
4. Portland-Blast furnace Cement 60-80	fairly slow	low	great	low	very good	very good	very sensitive	well-suited
5. Blast furnace-Portland Cements 85	slow	low	great	very low	very good	very good	very sensitive	well-suited
6. Supersulphated Cement	slow	low	great	very low	very good	very good	sensitive	well-suited
7. Lime-Slag d	very sensitive	usable						
C. Cements containing Pozzolana								
1. Portland-Pozzolana Cement 10-20	moderate	moderate	moderate	moderate	moderate	fairly poor	moderate	usable
2. Pozzolanic Cement 20-40	fairly slow	low	considerable	low	good	moderate	sensitive	appropriate
D. Other Cements								
1. High-Alumina Cement	very rapid	very high	negligible	very high	good	very good	insensitive	unsuited
2. Regulated-Set Cement	very rapid	very high	moderate	high	moderate	poor	insensitive	unsuited
3. Expansive Cement Type K	moderate	moderate	moderate	moderate	moderate	moderate	sensitive	conditional
4. Expansive Cement Type S	moderate	moderate	moderate	moderate	poor	poor	sensitive	conditional
5. Expansive Cement Type M	moderate	moderate	moderate	fairly high	poor	poor	sensitive	conditional
6. Masonry Cement	fairly slow	moderate	moderate	moderate	poor	poor	sensitive	unsuited
7. Natural Cement	fairly slow	moderate	moderate	moderate	fairly poor	fairly poor	sensitive	usable

préférences et la formation de l'ingénieur que par les conditions et habitudes locales. Par conséquent, la discussion ci-dessous concerne les principes, les éléments pratiques (méthodologie d'essai détaillée, champ des essais) étant laissés au choix du praticien. Pour cette raison, ce rapport ne contient aucun élément pratique, ces informations se trouvant dans les ouvrages cités en bibliographie. Des points de vue intéressants sont présentés en Ref. 13 qui traite notamment des qualités des bétons et des mortiers.

3.2. Influences du ciment sur la maniabilité du béton frais

Bien que l'influence du ciment sur ce paramètre soit rarement un élément décisif de choix, il peut parfois être utile de voir comment le ciment influence le comportement du béton frais. En l'absence de données sur le comportement du ciment (ou lorsque ces données font ressortir des anomalies), il faut procéder à des essais.

Les anomalies les plus courantes sont :

- prise instantanée;
- fausse prise;
- excédent d'air occlus;
- ressuage excessif.

On peut éviter la fausse prise par le choix d'un ciment à forte teneur en laitier de hauts fourneaux.

Le phénomène de ressuage pouvant résulter d'un broyage trop grossier du ciment, il peut être souhaitable de déterminer la finesse (ou surface spécifique) de celui-ci par les essais courants. Mais dans la pratique, il est souvent suffisant de procéder à un essai de ressuage (par exemple ASTM Designation C.232-71). De cette façon, on peut également étudier la possibilité d'amélioration de la mise en place du béton à l'aide d'adjuvants (notamment les réducteurs d'eau et les entraîneurs d'air) ou à l'aide d'un filler ou pouzzolane qui augmente la teneur en particules fines. Il peut être nécessaire de moduler la granulométrie de l'ensemble des granulats pour obtenir le résultat souhaité.

L'influence bénéfique d'un broyage plus fin sur la maniabilité du béton est démontrée par les recherches suédoises [réf. 1] sur les ciments à faible chaleur d'hydratation. Par contre, on a constaté, avec certains ciments, un raidissement accéléré ou une perte d'affaissement nécessitant un plus grand indice d'affaissement à la sortie du malaxeur pour tenir compte de la perte de fluidité pendant le transport.

3.3. Evolution de la résistance

La caractéristique la plus marquée du béton concerne l'augmentation de la résistance en fonction de l'âge. Il y a à ce sujet de très grandes différences suivant le type de ciment utilisé.

Afin de déterminer les caractéristiques d'un ciment au moyen d'essais sur le béton, il faut

choice between them will be influenced by personal opinion and background of the person making the decision, as well as by the local conditions and practice. Therefore the viewpoints presented in the following should be regarded in the first place as matters of principle, allowing for alternative practice as to details of testing methods, as well as to the extent of the tests. For this reason no actual working instructions are included in this report. Instead, a list of references has been appended to provide the information as needed. Useful points of view are presented e.g. in ref. 13 which deals particularly with the evaluation of concrete and mortar mixes.

3.2. Effects on workability of fresh concrete

Even if the effect of the type of cement on the workability of fresh concrete is rarely a decisive factor in the choice of cement it may sometimes be of interest to study how the properties of cement are reflected in the behaviour of fresh concrete. Testing should be done when there is no history of the cement or when the cement in question has a history of abnormal behaviour.

Unsatisfactory placing characteristics are usually due to :

- flash set;
- false set;
- excessive air-entrainment;
- excessive bleeding;

Cements having a high content of blast furnace slag generally avoid the possibility of false set.

Bleeding may be associated with coarse grinding of the cement, and therefore it may be desirable to determine the fineness or specific surface of the cement using conventional test methods. In practice it is usually sufficient to determine the bleeding of concrete with a suitable bleeding test (for example ASTM Designation C232-71). In this way it is possible to study also the means of improving the placing characteristics of concrete through the use of admixtures (particularly water-reducing and air-entraining agents) or through the addition of suitable filler or pozzolanic material for the purpose of increasing the content of the finest particles in the concrete mixture. Sometimes it may become necessary to adjust the grading of the entire aggregate for arriving at the desired result.

The beneficial effect of finer grinding on the workability of concrete has also been observed in the Swedish investigations [ref. 1] with regard to low-heat cements. On the other hand, an early stiffening or some loss of slump has been noted with some cements, necessitating a somewhat higher slump at the mixer to provide for this loss of fluidity during the transportation of concrete to the forms.

3.3. Strength development

The dominating property of concrete is generally the development of strength with age, and in this respect there appear great differences when different cements are used.

It is evident that for the assessment of cement it is necessary to make strength tests

d'abord choisir l'origine des granulats, la granulométrie maximale de ceux-ci, et les autres ingrédients (ciment, pouzzolanes, entraîneur d'air, réducteur d'eau).

Les méthodologies d'essais, visant principalement la détermination de la résistance à l'écrasement sont si connues que nous limiterons les commentaires à quelques points seulement :

- Il est important de connaître la relation qui lie la résistance à l'écrasement au rapport C/E. On fait varier ce rapport, et éventuellement la consistance.
- Pour établir l'évolution de la résistance à l'écrasement en fonction de l'âge du béton, on procède à des essais à âge croissant (par exemple 3, 7, 14, 28, 56 et 90 jours, et parfois même 180 et 365 jours).
- Pour les besoins du programme des travaux (notamment le décoffrage), il faut également étudier la résistance initiale (à un ou deux jours). Il est parfois nécessaire de stocker les échantillons à basse température (par exemple, + 5 °C) pour étudier la sensibilité du ciment aux faibles températures hivernales.
- Pour un projet en climat chaud et aride, il faut étudier le comportement du coulis de béton à une température plus élevée en ce qui concerne l'évolution de la résistance, la maniabilité et notamment la perte d'affaissement.
- En cas d'ouvrage en béton massif, il peut être intéressant de fermer hermétiquement les échantillons (absence de perte de poids) au lieu de les faire durcir immergés ou en atmosphère humide. Ces échantillons donnent une meilleure représentation des conditions prévalant à l'intérieur d'un béton massif.
- On peut prévoir des essais rapides (à l'âge de 1 ou 2 jours) en guise de contrôle de qualité.
- Les adjuvants qu'on pense mettre dans le béton doivent être utilisés pour la confection d'échantillons d'essais [réf. 13, 14, 23 et 25].

3.4. Elévation de la température due à la chaleur d'hydratation du ciment

La chaleur d'hydratation du ciment est souvent étudiée seule, par la méthode dite de la « chaleur de dissolution ». Les résultats de ces essais normalisés sont aussi utilisés pour la classification des ciments selon leur chaleur d'hydratation. Cependant, cette méthode ne convient pas pour les ciments à laitiers. Des processus spéciaux sont adoptés lorsqu'il s'agit d'appliquer la méthode dite de la « chaleur de dissolution » à des ciments contenant des pouzzolanes ou du laitier de haut fourneau.

Les ciments Portland ordinaires présentent une évolution d'environ 80 cal/g (335 kJ/kg) pendant les sept premiers jours et les ciments de moins de 60 cal/g (251 kJ/kg) sur sept jours sont normalement qualifiés de ciments « à faible chaleur d'hydratation ». Les valeurs mentionnées sont obtenues quand le ciment s'hydrate à une température de + 20 °C. A des températures plus basses ou plus élevées, l'hydratation s'effectuera à une vitesse plus lente ou plus rapide, avec un dégagement de chaleur plus fort.

on concrete prepared with the cement or cements to be studied. Before proceeding with a concrete mix design programme the selection of the aggregate sources, the determination of the maximum size aggregates, the decision on the use of types of cement, pozzolana, air-entraining agent, and water-reducing admixtures must be made.

The procedures in making strength tests – mostly for determining the compressive strength – are so commonly known that only a few remarks seem appropriate :

- The relationship between the compressive strength and the water-cement ratio is mostly of great interest. Therefore batches of concrete should be made using different water-cement ratios and possibly different consistencies if considered necessary.
- The development of compressive strength with age should be studied using test specimens tested at different ages (e.g. 3, 7, 14, 28, 56 and 90 days and sometimes even at the ages of 180 and 365 days).
- From the point of view of the construction schedule (mainly removal of form work) the early strength (at the age of one or two days) should also be studied. In specific cases it may be of interest to make early age strength tests using storage of specimens at lower temperatures (e.g. +5°) to find out the sensitivity of cement to low temperature which may be encountered in winter time.
- If the project under investigation is located in a hot and arid climate the behaviour of concrete mixtures should be studied at correspondingly higher temperatures with regard to workability (particularly slump loss) and strength development.
- When massive concrete structures are involved it may be of interest to use sealed specimens (keeping constant weight) instead of curing in fog or water according to common practice. Sealed specimens would be able to portray the strength development of concrete in the interior of a massive structure in a more representative way than moist-cured standard specimens.
- For the purpose of the quality control of concrete it may be advisable to include rapid strength tests (at the age of one to two days) in the testing programme.
- When admixtures are intended to be used in the actual concrete production they should be used also in the concrete tests for comparing the different cements under investigation [ref. 13 & 14 and 23 & 25].

3.4. Temperature rise due to heat of cement hydration

It is common practice to investigate the heat of hydration of cement as a separate and independent property of cement, using the so-called heat-of-solution method. Results of these standardized tests are also used for the classification of cements as to the heat of hydration. Special procedures are adopted when applying the heat-of-solution method to cements containing pozzolana or blast furnace slag.

Ordinary Portland cements have a heat evolution generally around 80 cal/g (335 kJ/kg) during the first seven days, and cements showing a heat evolution less than 60 cal/g (251 kJ/kg) during seven days are usually classified as “low-heat” cements. The values mentioned are obtained when the cement is hydrating at a temperature of +20 °C. At lower temperatures the hydration will proceed at a slower rate, and at higher temperatures relatively faster with correspondingly lower or higher heat evolution.

Le dégagement de chaleur, ainsi que le phénomène d'hydratation, se poursuit à un rythme décroissant pendant une très longue période, selon les conditions ambiantes, et ainsi, il est généralement impossible de déterminer la quantité totale de chaleur dégagée. Les essais couvrent une période plus ou moins longue (de 1 à 28 jours normalement), selon les besoins.

D'un point de vue pratique, il est de première importance d'être capable de prévoir l'élévation de température dans le béton qui dépend non seulement de la chaleur d'hydratation du ciment mais aussi de la composition du béton, de la température de mise en place et de l'élévation consécutive de température, des propriétés thermiques des granulats, etc. Une approche réaliste consisterait donc à étudier le dégagement de chaleur dans le même béton que celui utilisé pour la construction et en utilisant des méthodes calorimétriques (adiabatiques ou semi-adiabatiques). De cette façon l'effet de la plupart des facteurs mentionnés ci-dessus serait pris en compte. L'intérêt d'une telle méthode est encore plus évident en cas d'utilisation d'adjuvants (notamment de retardateurs ou accélérateurs de prise). L'échauffement du béton en place dépend également de la chaleur massique, de la température initiale et des possibilités de refroidissement [réf. 3].

Pour la détermination de la quantité de chaleur dégagée par un échantillon de béton, on utilise un calorimètre. Il en existe différents types, le plus simple étant le calorimètre « thermos » (réf. 50). Un autre type couramment utilisé est le calorimètre « adiabatique » [réf. 40 et 49]. Les deux conviennent jusqu'à un âge de sept jours, mais le calorimètre adiabatique le plus perfectionné (par exemple, réf. 40) convient jusqu'à 28 jours. A noter que la méthode calorimétrique permet de suivre l'évolution depuis le début, c'est-à-dire depuis le moment où l'échantillon est placé dans l'appareil. Le calorimètre thermos présente l'avantage supplémentaire de permettre la détermination de la chaleur massique du béton.

Les résultats obtenus avec ces appareils s'expriment en calories par gramme de ciment (ou en kJ/kg), permettant une comparaison aisée avec les résultats obtenus par la méthode dite « chaleur de dissolution ». Pour une bonne comparaison des résultats obtenus par les différentes méthodes, les températures effectives d'hydratation devraient être observées.

A ce sujet, il convient de rappeler qu'on emploie la méthode calorimétrique également pour l'étude de la chaleur d'hydratation de la pâte pure de ciment, depuis la mesure assez simple de l'échauffement d'un échantillon placé dans un thermos ordinaire jusqu'à l'emploi d'un appareil beaucoup plus perfectionné, tel que le calorimètre à conduction [par exemple, réf. 17].

3.5. Relation entre l'évolution de la résistance et un taux initial élevé d'échauffement pour différents types de ciment

Il est bien connu que l'évolution de la résistance ainsi que celle de la chaleur d'hydratation sont liées à l'hydratation progressive du ciment. Ainsi, plus l'hydratation se fait vite, plus importante sera la chaleur dégagée sur une période donnée, et plus grande sera la résistance du béton à un moment donné. Cette relation est plus évidente au début (les sept premiers jours). Le plus souvent, on cherche à obtenir une certaine résistance dans l'ouvrage, et si l'évolution de la chaleur qui en résulte peut parfois être favorable

It should be noted that the heat evolution, just like the whole process of hydration, continues at decreasing rate over a very long time depending on the prevailing conditions, and therefore the determination of the total heat evolution is generally not possible. Instead, the tests for the heat of hydration are carried out to cover a shorter or longer period (usually from 1 to 28 days) according to the need and interest in specific cases.

From the practical point of view it is of prime importance to be able to predict the temperature rise in the actual concrete which depends not only on the heat of hydration of cement but also on the mix proportions of concrete, the placing temperature and the subsequent temperature rise, the thermal properties of aggregate etc. Therefore a realistic approach would be to study the heat evolution in the same concrete mix as used for construction work and with the application of calorimetric (adiabatic or semi-adiabatic) methods. In this way the effect of most of the factors mentioned above would be taken into account. The need for such a method would become even more obvious when admixtures – particularly retarding or accelerating admixtures – are used in concrete. The resulting temperature rise in a concrete structure will additionally depend on the specific heat of concrete, the initial temperature and the cooling circumstances [ref. 3].

For determining the heat evolution in a concrete sample a calorimeter is used. There are several types of concrete calorimeters in use, the simplest of which probably is the so-called thermos calorimeter [ref. 50]. Another type used in practice is the adiabatic calorimeter [refs. 40 & 49]. Both types are applicable for the determination of the heat evolution up to the age of concrete of seven days and the adiabatic calorimeters of the most advanced design [e.g. ref. 40] may be used for measuring the temperature rise in a concrete sample through the age of 28 days. It is worth observing that the use of a calorimetric method offers the possibility of following the heat evolution from the very beginning, i.e. from the moment the sample has been placed in the calorimeter. The thermos calorimeter offers as an additional advantage the possibility for determining the specific heat of concrete in a sample.

The results obtained with the concrete calorimeter may be expressed also in units of calories per gram (or in kJ/kg) of cement, and thus comparison between these results and those of the heat-of-solution method becomes possible. For proper comparison between the results obtained with different methods the actual hydrating temperatures should be observed.

In this connection it seems necessary to mention that calorimetric methods have found application also in the study of heat evolution in cement paste without aggregate. Such methods range from the fairly simple measurements of temperature rise in a sample placed in an ordinary thermos flask to the more sophisticated apparatus such as the conduction calorimeter [e.g. ref. 17].

3.5. Interdependence of strength development and early rate of heat evolution for different types of cement

It is well known that both the strength development of concrete and the heat evolution in it are related to the progressive hydration of cement. Thus the higher the rate of hydration is, the more heat will be liberated in a given time and the higher the strength of concrete will be at a given moment. This becomes evident particularly during the early age (the first seven days) of concrete. In most cases a certain strength level is considered to be the basic requirement for concrete in the structure. The accompanying

(par exemple, en campagne d'hiver), néanmoins, dans les ouvrages massifs, il en résulte des gradients de température, avec risque de fissuration. Dans ce cas, le ciment parfait présenterait une évolution rapide de la résistance sans augmentation de la chaleur. Puisqu'un tel ciment ne peut exister il faut trouver un compromis et dans la pratique, il s'agit d'obtenir un béton présentant la résistance souhaitée tout en limitant l'échauffement. Pour ce faire, on peut préparer une série de bétons en faisant varier le type de ciment et les dosages, avec ou sans pouzzolanes, dans le but de maîtriser la résistance à différents âges et l'évolution de la chaleur. Le plus souvent, il est suffisant de déterminer l'évolution de la chaleur (voir §3.4) jusqu'à sept jours, mais l'échauffement dans l'ouvrage est fonction de plusieurs facteurs : ciment, dosages, température initiale, dimensions de l'ouvrage, refroidissement. Les données nécessaires sur l'évolution de la chaleur et de la température initiale seront ainsi différentes selon les cas. En particulier, si le chantier se déroule en climat froid, il faut en tenir compte dans les essais, avec mesure de l'échauffement jusqu'à 14 ou 28 jours.

Pour l'évolution de la résistance, il est nécessaire de poursuivre les essais jusqu'à 90 jours ou même jusqu'à 180 jours ou un an, notamment pour les ciments à faible chaleur d'hydratation avec ou sans pouzzolanes ou laitiers. A noter que le ciment à durcissement lent (faible chaleur d'hydratation) présente son plein intérêt seulement si le délai fixé pour arriver à la résistance voulue est porté jusqu'à 90 ou 180 jours par exemple. Si l'on se préoccupe d'obtenir une certaine résistance assez vite (7 ou 28 jours), il faudrait augmenter le dosage de ciment, perdant ainsi l'avantage de sa plus faible chaleur d'hydratation par rapport aux ciments ordinaires ou même prompts.

Pour les ciments préconisés pour les barrages massifs, le tableau 2 présente certaines caractéristiques du béton en fonction du ciment utilisé.

Par leur nature même, les barrages n'exigent pas une résistance initiale élevée, cette contrainte étant liée principalement au programme des travaux. On doit préférer, dans la plupart des cas, un ciment présentant une chaleur initiale moyenne ou faible. Dans ces conditions, les meilleurs ciments pour les barrages massifs présentant un compromis raisonnable entre l'évolution de la résistance et celle de la chaleur d'hydratation, seraient les ciments Portland à chaleur d'hydratation moyenne à faible (types A4 et A6) ainsi que les ciments de laitiers (types B 3, B 4, B 5 et B 6), à pouzzolanes 20-40 (types C 2). Si l'on préfère utiliser un ciment Portland en y ajoutant séparément le laitier ou la pouzzolane, on doit étudier les caractéristiques du béton ainsi obtenues selon les méthodes présentées ci-dessus afin d'optimiser le dosage.

3.6. Risque de fissuration d'un béton

La fissuration est un des inconvénients des ouvrages en béton massif. La cause réside dans les efforts créés par le retrait volumétrique, qui ne peut pas se faire librement. Ce retrait résulte soit de la baisse de température après échauffement initial, associée aux gradients de température éventuels dans l'ouvrage, soit de la réduction de la quantité d'eau contenue dans le béton.

heat evolution may be favourable under some circumstances (e.g. winter concreting) but in massive structures it gives rise to temperature differences with inherent risk of cracking. For such cases the ideal cement would be one with a good rate of strength development but without any heat evolution. As such a cement cannot exist it is necessary to find a compromise and the problem in practice then becomes to produce concrete having the desired strength characteristics combined with the lowest possible temperature rise. The above problem can be solved by preparing different test mixes of concrete – using different cements available with or without pozzolanas and/or varying mix proportions – and determining both the strength of test specimens at various ages and the heat evolution of concrete using samples from the same concrete mix. Mostly it is sufficient to determine the heat evolution – as explained in Section 3.4 – up to the age of seven days. It should be noted, however, that the temperature rise in the structure depends on several factors, such as the type of cement, mix proportions, the initial temperature, the size of the structure and the cooling conditions. Therefore the requirement of knowing the rate of heat evolution in a concrete mix at various ages and initial temperatures may vary from case to case. In particular, if low initial temperatures are anticipated during the execution of work, such temperature should be used also in the tests and the temperature rise should be measured up to the age of 14 or 28 days.

As to the strength development, it is necessary to extend the tests to cover also the age of 90 days, in some cases even 180 days or one year, particularly when low-heat types of cement and/or pozzolana or slag additions are being used. It is important to note that slow-hardening (low-heat) cement can be used with full advantage only if the specified age for the strength requirement of concrete can be extended to e.g. 90 or 180 days. If a certain strength level at a relatively early age (7 or 28 days) is decisive, the necessity of a higher content of low-heat cement would cancel out the advantage of its lower heat of hydration, compared with the use of an ordinary or even rapid-hardening cement.

With regard to the types of cement to be recommended for the construction of massive dams reference is made to Table 2, in which some relationship between cement and concrete properties are presented.

Owing to the nature of dam projects, the required early strengths of concrete are usually relatively low and dictated only by construction procedures. Usually cements with moderate or low rate of early heat evolution are to be preferred. From the above it follows that moderate-heat or low-heat Portland cements (types A4 and A6) as well as cements containing blast furnace slag (types B3, B4, B5 and B6), also Pozzolanic cements 20-40 (type C2), may be considered as being the most appropriate for massive dams, because they would offer a reasonable compromise between the desirable strength development and the inherent heat evolution. If the use of separate addition of slag or pozzolana in combination with a Portland cement is preferred, the properties of the resultant concrete should be investigated along the lines presented earlier for the purpose of verifying suitable mix proportions of the cementitious materials.

3.6. Tendency for cracking of concrete

The tendency for cracking is one of the drawbacks connected with massive concrete structures. The reason for cracking lies in the more or less restrained reduction of the volume of concrete, due either to the temperature drop after earlier temperature rise and/or to the possible temperature gradients within the structure, or to the drying shrinkage of concrete caused by the loss of free water.

Afin de combattre cet inconvénient, on a mis au point des ciments expansifs (Groupe D, tableaux 1 et 2), qui tendent à s'implanter sur le marché. Ils conviendraient pour n'importe quel ouvrage, mais il n'y a pas encore de précédents pour leur utilisation dans un ouvrage massif, tel qu'un barrage en béton. Leur prix élevé y est peut-être pour quelque chose.

Parmi ces phénomènes provoquant des variations de volume de béton, contribuant ainsi à sa fissuration, il faut citer en premier lieu l'influence de la température. Le retrait hydraulique est de second ordre (sauf en parois), car à l'intérieur du béton massif (par exemple, dans un barrage en béton), la vitesse d'absorption de l'eau est très faible ou nulle. Il faut noter cependant que la « dessiccation » intérieure provoquée par l'hydratation du ciment contribue à la fissuration, mais de façon mineure.

La fissuration du béton dépend non seulement de la valeur des tractions créées par ces phénomènes, mais également par l'extensibilité du béton ; il s'agit de sa déformabilité en allongement avant rupture [réf. 31], qui est fonction de ses caractéristiques d'élasticité, de fluage et de résistance à la traction.

L'influence de la température se manifestant par la valeur des gradients provoqués par l'hydratation du ciment, il est évident qu'on peut réduire le risque de fissuration par l'utilisation d'un béton présentant un faible échauffement (voir § 3.4 et 3.5). On peut également baisser la température initiale (mise en place) et réduire ces gradients pendant le durcissement du béton. Ces points ne sont pas discutés ci-après, mais ils sont sans aucun doute à prendre en compte, ainsi que le choix judicieux du ciment utilisé [par exemple, réf. 2, 3, 6 et 47].

On peut dire que pour un ciment donné, le risque de fissuration d'un béton est fonction du taux initial d'hydratation du ciment, le risque étant d'autant plus grand que ce taux est plus élevé. A ce sujet la nature d'un ciment est très bien représentée par son échauffement, déterminée comme décrite § 3.4.

Un autre moyen d'apprécier le risque de fissuration est l'essai dit « de fissurabilité à l'anneau » [réf. 12, 15, 48], qui élimine pratiquement les effets thermiques. Cet essai à retrait empêché est relativement rapide ; on mesure le temps nécessaire à la fissuration d'un échantillon en forme d'anneau (pâte de ciment ou mortier) coulé autour d'un gabarit en acier. Cet essai caractérise l'hydratation initiale du ciment. Le temps écoulé avant fissuration de l'anneau est très variable (de 1 heure à 2 ou 3 jours) selon les caractéristiques du ciment et la méthodologie. Cet essai semble intéressant dans la mesure où la corrélation entre les résultats des essais habituels de retrait libre (mortier ou béton) d'une part et d'autre part le taux de fissuration observé sur les ouvrages est assez médiocre. Cette mauvaise corrélation est évidemment due au fait que l'essai à retrait libre ne tient compte ni de l'hydratation initiale du ciment, ni du rôle de l'extensibilité. Pour ces raisons, l'essai à retrait libre ne sera pas discuté dans le présent rapport.

To counteract this disadvantage in concrete construction the expansive cements (in Tables 1 and 2 included in Group D cements) have fairly recently been developed to commercial stage. Although it has been brought out that expansive cement concrete could be used to advantage in almost all types of structures, no case can be quoted showing its use in a massive structure, such as a concrete dam. This may be due partly also to the comparatively high price of expansive cements.

Among the factors causing volume changes in concrete and thus contributing to the cracking tendency of concrete in massive structures the temperature effects hold the dominating position. The shrinkage due to the drying of concrete is of secondary significance only (except at exposed surface of the mass concrete), since in mass concrete structures the drying takes place extremely slowly if at all (e.g. in concrete dams). It should be noted, however, that the interior drying of concrete, so-called self-desiccation, due to the hydration of cement will be contributing to the cracking tendency, even though its effect is relatively small.

Whether certain tensile stresses, produced by the various factors mentioned above, really do result in the appearance of cracks, depends not only on the magnitude of the existing tensile stress but largely also on the extensibility of concrete, defined as the tensile strain capacity to failure [ref. 31], which on the other hand is a function of elasticity, creep, and tensile strength of concrete.

As the significance of the temperature effects in concrete depends on the magnitude of temperature differences occurring in the structure due to the heat of hydration of cement, it becomes obvious that one way of reducing the risk of cracking is the use of concrete with the lowest possible temperature rise (as discussed in the foregoing Sections 3.4 and 3.5). The other means of serving the same purpose are the lowering of the initial (placing) temperature of fresh concrete and the control and restriction of temperature gradients in hardening concrete. These methods will not be discussed further in this connection although they should certainly be considered together with the selection of the cement type to be used [e.g. refs. 2, 3, 6 & 47].

It may be said that the cracking tendency of concrete associated with the use of a certain cement type is related to the early rate of hydration of the cement, the cracking tendency being greater with higher rates of hydration. The nature of a cement in this respect is well portrayed by its heat evolution, determined as described in the foregoing Section 3.4.

A different approach for comparing cements as to the cracking tendency is offered by the use of the so-called ring test [refs. 12, 15 and 48], in which thermal effects are practically excluded. The ring test is a relatively rapid restrained shrinkage test, in which the time of cracking of an annular test specimen (of cement paste or mortar), cast around a steel core, is used to portray the nature of the early hydration of cement. The time up to the cracking of the ring varies considerably (from about one hour to two or three days) depending on the characteristics of the cement tested and naturally also on the details of the test arrangement. This test would seem to deserve interest also from the point of view that the correlation between the result of the conventional free shrinkage test on cement mortar or concrete on one hand and the cracking tendency of concrete observed in practice on the other hand is rather poor. This is evidently due to the fact that in the usual free shrinkage test both the nature of the early hydration of cement and the role of the extensibility of material are disregarded. For the above reasons a discussion concerning the conventional free shrinkage test of mortar and concrete is omitted from the present report.

Il apparaît que les ciments à faible vitesse d'hydratation seraient préférables, à cause de leur moindre taux initial de dégagement de chaleur (moindre échauffement du béton). Mais si l'influence du ciment sur la fissuration du béton est fonction principalement des caractéristiques d'échauffement, il peut néanmoins être souhaitable, ou même nécessaire, d'évaluer l'extensibilité, c'est-à-dire la déformabilité avant rupture du béton : pour ce faire, il faut connaître le module de Young, le module de rupture, et le fluage du béton. On peut ainsi obtenir les données nécessaires à l'établissement du programme d'essai à entreprendre pour les besoins du projet.

Dans la pratique, le choix du ciment serait orienté sur le groupe de ciments cité à la fin du paragraphe 3.5. Pour le ciment Portland à faible chaleur d'hydratation, les expériences suédoises [réf. 1] ont montré une nette réduction du risque de fissuration par rapport aux ciments Portland ordinaires.

Le prix de revient de ce ciment étant généralement élevé, compte tenu de l'étroitesse de son marché, on préfère souvent les ciments contenant du laitier de haut fourneau pour obtenir le même résultat bénéfique.

3.7. Sensibilité aux basses températures

L'une des caractéristiques des réactions chimiques qui interviennent au cours de l'hydratation du ciment est leur sensibilité à la température, c'est-à-dire que la vitesse des réactions est fonction directe de la température. Néanmoins, on constate des différences entre les différents types de ciment par suite de leur vitesse propre d'hydratation. Cette sensibilité peut exercer une influence non négligeable en cas de bétonnage par temps froid (campagne hivernale), et il faut toujours en tenir compte le cas échéant.

D'après le paragraphe 3.4, on comprend que la vitesse d'échauffement du béton peut être augmentée par un surdosage en ciment.

La faible vitesse d'hydratation qui se produit par temps froid est naturellement associée à une réduction de la chaleur, et il faut donc prévoir une protection initiale du béton frais contre le gel. Il peut s'agir, selon le cas, d'un matériau isolant placé sur les coffrages et sur la surface supérieure de la levée et éventuellement un dispositif de chauffage (qui peut gêner les travaux). La réduction de la vitesse de durcissement peut retarder le décoffrage. Il est parfois difficile d'assurer convenablement la cure du béton.

Ces difficultés sont plus marquées dans les ouvrages minces, leur influence étant beaucoup plus réduite en cas de béton de masse. Ainsi, dans les ouvrages massifs, tels que les barrages monolithiques, l'utilisation de ciments à hydratation retardée ne pose pas de problèmes particuliers : il faut seulement protéger le béton (surface extérieure des levées, angles saillants) contre le gel avant son durcissement. C'est pour cette raison que ce paramètre est présenté dans le tableau 2, mais aussi parce que les ouvrages massifs peuvent être reliés à des ouvrages minces.

Plusieurs études de laboratoire ont démontré que l'augmentation de la résistance du béton peut être considérée comme suivant à peu près des fonctions dites « de maturité ».

Considering the influence of the type of cement on the cracking tendency of concrete it seems clear that cements with slow rate of hydration would be preferable because of their lower rate of early heat evolution, leading to lower rise of temperature of concrete. Although the effect of the type of cement on the cracking tendency of concrete is mainly due to the characteristics of the heat evolution, it may be desirable and even necessary to estimate the extensibility, i.e. the tensile strain capacity of concrete, which can be done [refs 21 & 53] on the basis of knowing the modulus of elasticity, the modulus of rupture, and the creep of the concrete in question. Thus it is possible to obtain information for initial planning of investigations and tests that should be accomplished for the project.

In practice the choice of cement would concentrate on about the same group of cements mentioned at the end of Section 3.5. With regard to low-heat Portland cement the Swedish experiences [ref. 1] have shown that the use of such cement has greatly reduced the risk of crack formation as compared with the use of ordinary Portland cement.

As the cost of producing low heat Portland cement is generally high because of the limited demand, many countries have adopted the use of cements containing blast furnace slag to obtain the same favourable results.

3.7. Sensitivity to effects of low temperature

It is characteristic of the chemical reactions taking place during the hydration of cement that they are temperature-dependent, that is, accelerated by temperature rise and retarded at low temperature. In this respect, however, different cement types show somewhat different behaviour owing to their inherent rate of hydration. The sensitivity to the influence of low temperature is a property of cement which may have great practical significance in concrete work carried out during the cold season (winter time), and therefore it should not be overlooked in case low temperatures should be encountered.

As can be inferred from Section 3.4, the rate of heat evolution in concrete can be increased also by using additional cement.

A slow rate of hydration at low temperature is naturally accompanied by a reduced heat evolution with consequent need to protect green concrete against freezing during the early stage of hardening. The protection may include insulation of the forms and on top of finished concrete surfaces and/or some kind of heating arrangement which may cause inconvenience with regard to the working schedule. The slow rate of hardening may also cause delay in the stripping of forms, and proper curing of concrete may be difficult to arrange.

It should be noted, however, that the difficulties referred to above are accentuated with thin structures and have far less importance for mass concrete. From this it follows that in massive structures, such as dam monoliths, the use of slowly hydrating types of cement does not present any particular problems, except that concrete should not be allowed to freeze at exterior surfaces or in protruding corners before gaining sufficient maturity. The sensitivity to low temperature has been included in Table 2 mainly for the above reason and because thin structures may also occur in connection with mass concrete work.

It is known from several laboratory investigations that the strength development of concrete can be described approximately by so-called maturity functions. One example of

Un exemple d'une telle fonction est la fonction temps-température, définie comme la somme des produits du temps (en jours) par la température (en prenant comme origine -10 °C), ainsi : $\text{maturité} = \sum \text{jours} \times (T + 10\text{ °C})$. Dans ces conditions, il peut être nécessaire d'effectuer les essais de résistance après stockage à basse température (par exemple $+5\text{ °C}$ et $+10\text{ °C}$), éventuellement avec des passages à température normale afin d'établir la corrélation qui lie les faibles valeurs de la fonction temps-température aux valeurs correspondantes de la résistance à l'écrasement. Cette particularité mise à part, la méthodologie d'essai est classique.

La relation résistance/maturité dépend également des caractéristiques du ciment, et plus généralement, de la qualité du béton [réf. 36], cette relation ne restant valable que pour une fourchette de température donnée. Par exemple, le comportement du ciment Portland à laitier est quelque peu différent de celui des ciments Portland ordinaires, l'augmentation initiale de la résistance étant assez lente à faible température. Aussi, ces ciments sont-ils plus sensibles à l'influence de la température que les ciments Portland ordinaires. L'addition sur le chantier de pouzzolane ou de laitier aurait la même influence.

4. INFLUENCE DU TYPE DE CIMENT SUR LA PÉRENNITÉ DU BÉTON

4.1. Généralités

Ce paramètre est étudié depuis longtemps, notamment en fonction de la composition chimique du ciment. On peut facilement prévenir les dégâts provoqués par un excédent de chaux ou de magnésie libres en observant les normes, qui prévoient des essais (respectivement essai Le Chatelier et essai à l'étuve) pour mettre en évidence ces substances ainsi qu'en limitant la quantité de MgO contenue dans le ciment. Les ciments à forte teneur en laitiers de haut fourneau sont exempts de ce risque.

Pour les autres détériorations, il faut noter que l'influence du ciment est souvent masquée par la nature des granulats (composition chimique, qualité, caractéristiques thermiques, etc.) ou par certaines caractéristiques du ciment lui-même (impermeabilité qui influence le phénomène d'occlusion d'air, etc.). Par exemple, les résultats des études [réf. 32] sur la relation entre la résistance au gel du béton et la nature du ciment utilisé ne sont guère valables pour guider le choix du ciment, car les données sur le rôle possible de l'air occlus sont insuffisantes. En effet, on croit qu'un bon entraînement d'air est le moyen primordial de conférer au béton une bonne résistance au gel, ce paramètre éliminant l'influence propre du ciment, en totalité ou en partie.

Les études de laboratoire, ainsi que les expériences pratiques, démontrent que la perméabilité du béton détermine en grande partie sa vulnérabilité aux agents externes. Pour cette raison, il faut un béton assez imperméable pour assurer sa pérennité et pour protéger les armatures contre la corrosion. Par ailleurs, cette perméabilité est fonction principalement des vides interstitiels et aussi de la composition du béton (notamment le rapport C/E). Les caractéristiques propres du ciment ont peu d'influence, malgré les observations selon lesquelles, pour un rapport C/E donné, un ciment à broyage grossier augmenterait la porosité et la perméabilité par rapport à un ciment fin. Ceci provient

such a function is the time-temperature function, the cumulative sum of the products of time (in days) and temperature level with reference to $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (maturity $\Sigma \text{ days} \times (T + 10\text{ }^{\circ}\text{C})$). Therefore it might be necessary to carry out strength tests using storage at lower temperatures (e.g. $+5$ and $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$) and/or short storage periods at normal temperature to be able to correlate the small values of the time-temperature function with the corresponding values of the compressive strength of concrete. The procedure in the tests follows the conventional lines in other respects.

It should be kept in mind, however, that the strength-maturity relationship depends on the properties of the cement and on the general quality of the concrete [ref. 36], and is valid only within a particular range of temperature. For example Portland-Blast furnace cements behave somewhat differently from ordinary Portland cements and show a rather slow early strength gain in the low temperature range. Therefore cements of this type are more sensitive to the influence of low temperature than ordinary Portland cements. Site addition of slag or pozzolana will have the same influence.

4. INFLUENCE OF CEMENT TYPE ON DURABILITY OF CONCRETE

4.1. General

The influence of the characteristics of cement on the durability (in the broad sense) of concrete has been extensively studied particularly from the point of view of the chemical composition of cement. The deterioration of concrete due to excessive amounts of free lime or free magnesia is ordinarily prevented by current cement specifications which include suitable tests (Le Chatelier or autoclave tests, respectively) for determining the presence of these components, and by limitation of the amount of MgO in the cement. Cements with high content of blast furnace slag are not subject to such risks.

As to the durability in other respects, it should be noted that the influence of the type of cement on the resistance of concrete against various deteriorating actions is often obscured by the nature of the aggregate, i.e. its chemical composition, soundness, thermal characteristics, etc. and/or by some inherent properties of concrete, such as the impermeability or the pore characteristics (air-entrainment). As an example it may be mentioned that the results of the extensive investigations reported in ref. 32 concerning the dependence of the frost resistance of concrete on the nature of cement, can hardly be considered applicable for the selection of cement type because of the insufficient observation of the possible role of the air-entrainment. It has been generally accepted that proper air-entrainment is the decisive factor in securing adequate frost resistance of concrete, and the effect of this factor mostly suppresses or totally outweighs the influence of the cement type.

It has been shown both by laboratory tests and by practical experience that the permeability of concrete largely determines its vulnerability to external agencies. Therefore concrete must be relatively impermeable in order to be durable and to be able to protect the reinforcement against corrosive effects. On the other hand, the permeability of concrete depends mainly on the content of capillary pores and thus on the composition (in the first place the water-cement ratio) of concrete. The cement type as such has in this respect only a very limited influence, although it has been observed that coarse-ground cement tends to produce a somewhat higher porosity and permeability than a

évidemment de la différence dans la maniabilité et le ressuage du béton frais, différence provoquée par la variation dans la surface spécifique du ciment (voir § 3.2). D'un autre côté, un ajout excessif de matériaux de résidus qui consommeront le Ca(OH)_2 du béton en cours d'hydratation, pourrait augmenter le risque de corrosion des armatures.

Certains adjuvants peuvent avoir une influence analogue (par exemple entraîneur d'air ou pouzzolanes).

Pour conclure, la nécessité de réduire la perméabilité (béton étanche) ne constitue pas un élément de choix du ciment à utiliser, sauf en ce qui concerne la finesse.

Par ailleurs, le problème de la protection du béton frais doit tenir compte du ciment utilisé.

Les paragraphes suivants sont consacrés à certains aspects de la pérennité du béton liée à la composition chimique du ciment.

4.2. Résistance du ciment au lessivage

Le lessivage de certains constituants du béton qui a fait prise (principalement de la chaux) par certaines eaux (eau pure, eau acide) est une caractéristique défavorable du ciment qui varie d'un type à un autre [réf. 1 et 30].

Dans certaines zones des barrages (fissures qui débitent, joints, zones d'imperméabilité suspecte) on peut souvent observer des efflorescences provoquées par la précipitation du carbonate de calcium, et parfois aussi du sulfate de calcium. Ce phénomène de lessivage est en relation avec la teneur en hydroxyde de calcium créé par l'hydratation du ciment. Ainsi, l'importance de ce phénomène est liée à la composition du ciment utilisé.

Dans les essais suédois, on constate une nette différence entre le comportement d'une part du ciment Portland à laitier et le ciment à pouzzolanes et d'autre part du ciment Portland ordinaire pour un débit d'eau donné (lessivage et perte de résistance moindres pour les premiers [réf. 52]).

On a proposé des essais de lessivage pour le béton [réf. 30 et 52], mais dans la pratique, il semble suffisant de se limiter à l'étude du ciment seulement. Le risque de lessivage du béton peut être fortement réduit par l'utilisation de la pouzzolane (ciments à pouzzolanes ou dosage de la pouzzolane dans la bétonnière) ou d'un ciment à laitier, ces ciments étant préconisés en cas de risque de lessivage [réf. 52].

Cependant, on a peut-être surestimé l'influence de ce phénomène, et actuellement, la solution passe par une bonne imperméabilité du béton (voir-ci-dessus).

4.3. Résistance du béton aux agressions chimiques

La pérennité du béton en cas d'agression chimique varie en fonction du ciment utilisé, mais dans certains cas, la densité ou l'imperméabilité du béton exerce une influence telle qu'elle élimine celle du ciment [par exemple, ref. 30 et 36]. Ainsi s'il y a un

finer cement for the same water-cement ratio. This effect is evidently due to the differences in the workability and bleeding of fresh concrete caused by differences in the specific surface of cement, which was touched upon in Section 3.2. On the other hand an excessive addition of waste materials, which will consume the Ca(OH)_2 of hydrating concrete, may increase the risk for corrosion of reinforcement.

Similar effects may be brought about through the use of certain admixtures, as e.g. air-entraining agents or pozzolanas.

On the whole it can be said that the requirements for low permeability (good watertightness) of concrete is usually not a factor influencing the choice of cement type, except that the fineness of grinding should be considered.

In addition, the varying need for effective curing of concrete at the early stage should be taken into account in relation to the type of cement used.

In the following sections some aspects of durability are discussed having a bearing on the chemical composition of cement.

4.2. Resistance of cement to leaching

The removal or leaching of water-soluble constituents, mainly lime compounds, from hardened concrete by pure and acid waters is one of the undesirable characteristics of cement, in respect of which different types of cement behave somewhat differently [refs. 1 & 30].

Efflorescence due to precipitation of calcium carbonate – sometimes also calcium sulphate – is often observed on dam structures in the neighbourhood of leaky cracks and construction joints or at points of inferior watertightness of concrete. The leaching phenomenon is associated with the content of calcium hydroxide in concrete produced by the hydration of cement, and therefore the degree of leaching will be related to the composition of the cement.

In the Swedish leaching tests a marked difference between different types of cement has been verified in the way that Blast furnace-Portland cement and Pozzolanic cement showed essentially less leaching and lower loss of strength than ordinary Portland cement for a given rate of water permeation through concrete [ref. 52].

Although test methods have been presented for studying cements for leaching [refs 30 & 52], it seems sufficient in practice to consider the composition of cement only. The tendency for leaching in concrete may be considerably reduced through the use of pozzolana – either as blended Portland-Pozzolana cement or as a separate addition of pozzolana to the concrete mix – or by using Portland-Blast furnace cements, and therefore these cements are to be recommended in cases when leaching should be avoided as much as possible [ref. 52]. On the other hand, the significance of the removal of lime by leaching may have been overestimated in the past, and in the present practice the problem of the deterioration from this action is overcome by producing concrete with low permeability, as referred to already in the foregoing section.

4.3. Resistance of cement to chemical attack

The durability of concrete under the action of chemical attack varies with the types of cement used, but it should be pointed out, however that in some cases the density and impermeability of the concrete influence its durability to such a degree that they overrule

risque d'agression chimique (acides, sulfates), il est primordial de prévoir un béton résistant et imperméable.

Acides : Il n'existe pas de ciments Portland résistant aux acides. Les ciments à laitier de haut fourneau ou à pouzzolane sont quelque peu meilleurs.

Sulfates : La résistance aux sulfates est une caractéristique du ciment nécessaire lorsque le béton est exposé aux eaux de formation qui contiennent des sels en solution (alcalis, sulfates de magnésium ou de calcium). Sans approfondir les réactions chimiques, on peut noter que les produits de ces réactions ont un volume bien supérieur à celui des substances initiales, provoquant une dilatation et une désorganisation du béton.

Dans la pratique, on peut souvent avoir une idée approximative de la résistance du ciment en regardant sa composition. Une faible teneur en aluminates tricalciques (C_3A) du ciment Portland, associée à un C/E assez faible, peut assurer une bonne résistance à l'attaque par les sulfates de magnésium et de sodium; pour les sulfates de calcium, on préfère un ciment à assez forte teneur en laitiers de haut fourneau. La limite supérieure de C_3A des ciments Portland dits « résistants aux sulfates » varie de 3 à 8 %) selon les normes appliquées et éventuellement selon la concentration des sulfates. Il existe également des ciments sans C_3A .

Outre le ciment résistant aux sulfates, il y a aussi les ciments Portland à au moins 70 % de laitiers, les ciments sursulfatés, les ciments à pouzzolanes et les ciments fondus qui présentent une résistance moyenne à forte (très forte pour le ciment fondu). Le tableau 2 donne une appréciation de ce paramètre.

A ce sujet, il convient de rappeler qu'un ciment Portland ordinaire additionné de pouzzolane ou de laitier broyé peut remplacer le ciment spécial.

Il peut être utile de faire des essais comparatifs pour déterminer la résistance aux sulfates des ciments disponibles pour un projet. On s'est efforcé de mettre au point un essai sûr et rapide, mais les résultats obtenus restent incohérents [réf. 30 et 43]. Voir, à ce sujet, le Symposium RILEM, 1969 [réf. 43]. La référence 35 est parmi les publications les plus récentes. Les essais de laboratoire préconisés dans certaines normes peuvent être utiles mais ils sont longs à exécuter et l'ordre de préférence qui en résulte ne coïncide pas toujours avec celui indiqué par les considérations pratiques. Heureusement, on dispose déjà d'un ensemble de données permettant le bon choix du ciment (et de la composition du béton en général) pour répondre aux besoins pratiques. Cependant, compte tenu de la complexité du phénomène, et pour permettre une appréciation suffisante des risques dans les cas difficiles, une étude plus approfondie des documents existants est fortement recommandable. Pour plus de détails, voir Annexe II.

the influence of the type of cement used [e.g. refs. 30 & 36]. Therefore it is of primary importance that concrete, which will be exposed to acidic or sulphate attack, should have a relatively high strength and a low permeability (good watertightness).

With regard to acid attack it is to be noted that no Portland cement is actually acid resistant. Cements containing blast furnace slag or pozzolana are somewhat better in this respect.

The resistance to sulphate attack is a property of cement, which is required when for example soil or groundwater containing soluble alkalies, magnesium or calcium sulphates is in contact with concrete structure. Without going into the details of the chemical reactions involved it can be noted, that the products of these reactions occupy a considerably greater volume than the compounds they replace, so that the reactions with the sulphates will result in the expansion and disruption of the concrete.

In most cases encountered in practice an at least approximate idea of the resistance to sulphate attack of a particular cement may be formed on the basis of its compound composition. It is generally recognized that a low content of tricalcium aluminate (C_3A) in Portland cement, together with a reasonably low water-cement ratio, usually ensures a satisfactory resistance of concrete to the damaging effects of magnesium and sodium sulphates, while in regard to calcium sulphates the use of cements with relatively high content of blast furnace slag is considered preferable. The maximum allowable C_3A content in so-called sulphate-resisting Portland cements varies between 3 and 5 per cent (in some cases 8 per cent) depending on the specification applied and sometimes also on the concentration of sulphates. There are on the market also cements containing no C_3A at all.

In addition to sulphate-resisting Portland cements, Portland-Blast furnace cement containing at least 70 percent of slag, supersulphated cement, pozzolanic cement, and high-alumina cement are considered to offer medium to high (for high-alumina cement very high) resistance to sulphate attack. An approximate assessment of various types of cement with regard to the resistance to sulphate attack is included in Table 2.

In this connection it should be noted that instead of using a blended cement, the separate addition of either pozzolana or ground slag together with a straight Portland cement may offer an alternative for ensuring satisfactory resistance of the concrete to sulphate attack.

Sometimes it may be desirable to run comparative tests for determining the relative sulphate resistance of the available types of cement. Considerable effort has been devoted to the development of a reasonably rapid and reliable test method for this purpose, but so far the results are still rather inconsistent [refs 30 & 43], which is clearly revealed by the results of the RILEM Symposium in 1969 [ref. 43]. As an example of the more recent papers on this subject, ref. 35 has been included in the list of references. Laboratory tests included in some standards or specifications may yield useful information, but they are usually very time-consuming and do not always place different cements in the same order of merit as would be the case in practical conditions. Fortunately, there is already sufficient information available for selecting the type of cement (and the composition of concrete in other respects) to satisfy the requirements of a specific application. However, considering the often complicated nature of sulphate attack and for adequate assessment of the risks involved in more difficult specific cases met with in practice, a more detailed study of the available literature on this subject is strongly recommended. For further discussion see also Appendix II.

4.4. Composition du ciment et réactions alcali-granulat

La détérioration du béton peut être provoquée par la dilatation qui suit la formation, dans le béton, du gel alcali-silicate, par réaction entre les alcalis contenus dans le ciment et la silice active des granulats, soluble dans une solution alcali-hydroxyde. On peut éliminer ce phénomène par une limitation de la teneur totale en oxydes de sodium et de potassium (équivalent) ($\text{Na}_2\text{O} + 0,658 \text{K}_2\text{O}$) du ciment. La limite supérieure est fixée à 0,60 % (masse).

On peut obtenir le même résultat en prévoyant, dans le béton, une certaine quantité de silice active sous forme très fine, par l'utilisation d'un ciment à pouzzolanes ou par l'introduction dans la gâchée d'une pouzzolane convenable (par exemple certains types de cendres volantes réduisent la réactivité). Les quantités nécessaires dépendent du type de pouzzolane utilisé. Il faut noter que l'utilisation d'un ciment à forte teneur en laitiers (50 à 65 % ou plus, selon la teneur totale en alcali du ciment [réf. 59]) permet de résoudre ce problème lorsqu'on ne dispose pas d'un ciment à basse teneur en alcalis. Il faut appliquer une des solutions indiquées ci-dessus lorsque les granulats présentent un risque de réactivité.

En cas d'introduction de pouzzolanes dans la gâchée, il est souhaitable de contrôler la quantité de ce matériau, ainsi que le dosage nécessaire. En règle générale, les pouzzolanes naturelles sont plus efficaces que les cendres volantes.

Depuis peu, on observe un autre type de réaction à l'alcali. Il s'agit d'une réaction entre le ciment de certaines roches carbonatées (dolomies et calcaires argileux fins). On peut minimiser les dégâts par l'utilisation d'un ciment à faible teneur en alcalis (moins de 0,40 % Na_2O équivalent), si les granulats ne contiennent pas plus de 15 % de roches réactives [réf. 33, 51 et 55]. Mais il vaut mieux éviter ces granulats, par exemple en changeant de carrière. Certains prescripteurs sont moins sévères sur ces points. Pour plus de détails, voir Annexe II.

5. NOTES SUR LES DOMAINES D'APPLICATION DE DIVERS CEMENTS

5.1. Généralités

Le tableau 2 est destiné à préciser l'influence du ciment sur les principales caractéristiques du béton et le domaine d'application des différents ciments dans les grands barrages. Quelques commentaires supplémentaires semblent nécessaires.

Les ciments disponibles dans différents pays sont très variables. Les ciments Portland, notamment le ciment Portland ordinaire (A. 3, tableaux 1 et 2) prédominent en général. On peut faire varier les caractéristiques du ciment Portland pour obtenir les types indiqués dans les tableaux 1 et 2, mais les matières premières peuvent manquer, limitant la gamme disponible dans une région donnée. Cependant, les considérations d'ordre commercial exercent souvent une plus grande influence sur les types de ciment vendus.

4.4. Cement composition and alkali-aggregate reaction

Deterioration of concrete may in certain cases be due to the swelling of the alkali-silicate gel formed in concrete by the reaction of the alkalies of cement and the active silica, soluble in alkali-hydroxide solution, of the aggregate. This type of deterioration can usually be prevented by limiting the total amount of sodium and (equivalent) potassium oxides ($\text{Na}_2\text{O} + 0.658 \text{K}_2\text{O}$) in Portland cement to 0.60 percent by weight.

The same result may be obtained by using adequate amounts of finely divided active silica in the concrete, introduced into it by using pozzolanic cement or by separate addition of suitable pozzolana (e.g. certain types of fly ash will reduce the potential reactivity) into the concrete mix, the amount needed depending on the type of pozzolana. It should be noted that the use of a cement with high content of blast furnace slag (50 ... 65 percent or over, depending on the total alkali content of cement [ref. 59]) likewise offers a possible solution for avoiding the danger of alkali-aggregate reaction in cases when low-alkali Portland cement is not obtainable. One of the above measures should be resorted to where the use of potentially reactive aggregate materials cannot be avoided.

When pozzolana is separately added, it is advisable to verify the quality of the pozzolanic material and the proper amount to be used through appropriate tests. Natural pozzolanas are generally more effective than fly ash in reducing alkali-aggregate reaction.

Another type of alkali-aggregate reaction has during recent years been observed to take place between the alkalies of cement and certain carbonate rocks (dolomites and fine-grained argillaceous limestones). Deterioration of concrete due to this type of reaction may also be minimized by the use of very low-alkali cement (containing less than 0.40 percent Na_2O equivalent), provided that the amount of potentially reactive rock [refs. 33, 51 & 55] is limited to 15 percent of total aggregate. Preferably the use of such aggregate should be entirely avoided e.g. by the application of selective quarrying. Some authorities may be rather less stringent in these respects. For further discussion see also Appendix II.

5. NOTES ON FIELDS OF USE OF DIFFERENT CEMENTS

5.1. General

For the purpose of giving an outline of the influence of various cement types on the main properties of concrete and of the general applicability of different cements for concrete for large dams Table 2 has been compiled. A few supplementary remarks may be justified in this connection.

The availability of various types of cements varies greatly from one country to another depending on the local conditions. However, it can be noted that Portland cements, and particularly the ordinary Portland cement (A. 3 in Tables 1 and 2), hold the dominating share in cement production as a whole. The properties of Portland cement may be varied widely to produce different types listed in Tables 1 and 2, but the composition of local raw materials does not always allow the production of all the types. Commercial considerations are more often the stronger limiting factors.

En outre, il peut exister des variations géographiques pour un ciment donné (par exemple, ciment Portland ordinaire), à l'intérieur d'un pays. Par exemple, un ciment peut présenter une résistance mécanique bien plus élevée que celle spécifiée, et dans certains cas, on peut se demander s'il ne serait pas nécessaire de prévoir une limite supérieure.

Les ciments à composants secondaires (clinker Portland broyé avec du laitier de haut fourneau, ou pouzzolanes naturelles ou artificielles) peuvent remplacer les ciments ordinaires à durcissement plus lent. Normalement, il est plus économique de produire ainsi un ciment à faible chaleur d'hydratation en faibles quantités au lieu d'agir sur la composition du clinker. Compte tenu de l'énergie absorbée par la fabrication du ciment, ceci peut évidemment être une raison pour préférer les ciments à composants secondaires. En outre, l'utilisation des cendres volantes ou du laitier de haut fourneau permet également de récupérer un sous-produit qui serait perdu. Pour ces raisons, les progrès réalisés dans l'utilisation de ces composants secondaires (à la cimenterie ou sur le chantier) méritent notre considération, afin de profiter de tous les avantages possibles [réf. 24].

Le tableau 2 présente également une appréciation approximative des différents ciments en relation avec la réalisation d'ouvrages massifs tels que les barrages monolithiques. Comme il a déjà été dit ci-dessus, le choix du ciment à utiliser doit tenir compte des éléments tels que :

- possibilité de modification des détails du projet ou du chantier ;
- possibilité d'ajouter de la pouzzolane au ciment ;
- sources des granulats (par exemple, choix entre les alluvions ou les enrochements), etc.

Il n'existe pas de ciment répondant à l'ensemble des critères en jeu, aussi ce problème revient à choisir le ciment qui, dans les conditions réelles, s'adapte le mieux aux contraintes.

Dans ces conditions, il est évident que les ciments qualifiés de peu convenables ou impropres aux ouvrages massifs (tableau 2) s'adaptent parfois bien aux ouvrages spéciaux [par exemple réf. 37]. Pour cette raison, il est justifié d'en tenir compte dans la présente étude des ciments.

5.2. Utilisation de ciments à faible chaleur d'hydratation

Il convient tout d'abord de citer les études exécutées pendant les années 60 et les expériences acquises par le sous-comité sur le béton du Comité Suédois de la CIGB, dans le domaine de l'utilisation et des caractéristiques des ciments à faible chaleur d'hydratation appliqués à la réalisation d'ouvrages hydrauliques. Les résultats principaux sont précisés dans le rapport publié par ce comité [réf. 1]. Quelques commentaires sur ces recherches sont donnés dans l'Annexe I de ce Bulletin.

Depuis les années trente, en Suède, on utilise ces ciments dans les ouvrages lourds, et en général, les résultats obtenus sont bons, notamment en ce qui concerne le risque de fissuration. Il convient donc de s'assurer que ce ciment continue d'être disponible sur le marché. Au contraire, aux Etats-Unis, il semble que les ciments du Type IV (faible chaleur d'hydratation) aient quasiment disparus en faveur du Type II modifié (chaleur

In this connection it should also be noted that the characteristics of cement may vary even between cements of the same nominal type (e.g. ordinary Portland cement), produced in different localities in the same country. Often it occurs that, using a particular cement, considerably higher strengths are produced than those required by the relevant specification and in some cases this has raised the question of the need for an upper limit requirement for the strength range.

The blended cements containing Portland clinker interground with blast furnace slag, or natural or artificial pozzolanic material, may be considered as substitutes for straight Portland cements with slower rates of hardening. It is usually more economical to produce small quantities of low-heat cements in this way instead of by changing the composition of Portland clinker. Considering the consumption of energy in cement manufacture it is obvious that blended cements may be preferable also from this point of view. Using fly ash or blast furnace slag would involve also the aspect of recycling industrial waste material into beneficial use. Therefore the advances in the use of blended cement and/or separate addition of pozzolana or ground blast furnace slag should deserve careful consideration in order that all the potential advantages in this field could be fully utilized [ref. 24].

Table 2 contains also a rough assessment of the applicability of the listed cement types for use in the construction of massive structures such as dam monoliths. As discussed earlier in this report the choice of the cement to be used should be based on the consideration of all pertinent factors, such as :

- the possibilities of altering the details of design and construction procedures;
- the possibility for separate addition of pozzolana;
- alternative aggregate sources (e.g. alluvium against quarry), etc.

As there is no ideal type of cement in existence the problem will be reduced to selecting a cement which in the prevailing circumstances will be in harmony with all the other aspects under consideration.

On the basis of the foregoing it is obvious that the types of cement listed in Table 2 and indicated as being less suitable or quite unsuited for massive structures may find excellent cases of application in special types of work [e.g. ref. 37]. For this reason their inclusion in the list of cements for concrete for large dams seems well justified.

5.2. Use of low-heat cements

At this point it seems appropriate to draw attention to the investigations carried out during the 1960's and the experiences gathered by the Sub-Committee on Concrete of the Swedish National Committee on Large Dams, concerning the use and properties of low-heat cements for hydraulic structures. The principal results and findings have been summarized in their report [ref. 1]. For some brief notes on these investigations see also Appendix I to this Bulletin.

Low-heat cements have been used in Sweden since the 1930's for heavy concrete structures and with generally good results particularly with regard to the risk of crack formation. Therefore it is considered necessary that this type of cement should continue to be available for use in massive structures. On the other hand, the observation has been made that in the USA the use and production of Type IV (low-heat) cements seems to have become almost completely substituted for by the so-called modified (Type II or

moyenne), souvent mélangés à la pouzzolane pour réduire la chaleur d'hydratation au maximum.

On constate une tendance analogue ailleurs, par exemple au Mexique, où le Type IV n'est plus fabriqué depuis 1950. Pour l'exécution des barrages, on utilise principalement le Type II (modifié) ou des ciments à laitier ou à pouzzolanes à faible teneur en C₃A.

Il est peut-être plus avantageux techniquement ou économiquement de prévoir un abaissement de la température de mise en place associé ou non à un dispositif de refroidissement si le ciment à faible chaleur d'hydratation est rare, et donc coûteux, dans la région du projet.

5.3. Ciments pour climats chauds ou froids

La relation entre la température du béton et la vitesse d'hydratation du ciment est maintenant bien connue. Plus la température de mise en place est élevée, plus rapides seront les réactions chimiques et plus le gain de résistance du béton sera rapide au cours des premiers jours. Mais au-delà de sept jours environ, on peut constater une baisse de résistance par rapport aux conditions normales. En outre, une température élevée accélère le raidissement du béton frais, nécessitant une plus forte teneur en eau. Il est prudent de prévoir des essais sur le chantier avant d'entreprendre les travaux dans un climat inconnu (notamment les climats chauds et secs).

Pour les climats chauds, il semble préférable de choisir un ciment présentant une vitesse de durcissement faible à moyenne (c'est-à-dire les ciments à faible chaleur initiale), afin de réduire l'échauffement du béton. Les ciments à forte teneur en laitiers fins présentent l'avantage supplémentaire d'éliminer la fausse prise et de retenir bien l'eau de gâchage.

Pour les climats froids, voir § 3.7 (sensibilité du ciment aux faibles températures).

6. RÉSUMÉ

Une étude sur les types de ciments actuellement disponibles pour la réalisation des grands barrages en béton a conduit à dresser les tableaux 1 et 2, basés, dans toute la mesure du possible, sur la méthode de classification de la Recommandation ISO R 597. Néanmoins, compte tenu des variations d'une norme à une autre, ces tableaux résultent d'un compromis qui doit servir principalement comme base de discussion des différents éléments entrant dans le choix d'un ciment pour une utilisation donnée. A noter que l'on a inscrit dans ces tableaux certains ciments qui ne sont pas habituellement utilisés dans les grands barrages, car ils peuvent être utiles pour les travaux spéciaux liés aux barrages. A noter aussi que les spécifications de ciments sont sujettes à une évolution continue.

Avant de fixer son choix, il faut procéder à des essais. Les essais préconisés dans les normes concernent avant tout les exigences de fabrication, permettant aux ciments de

medium-heat) cement, which is frequently also used in combination with a pozzolana further to reduce heat generation.

Similar development has taken place also in other countries, for example in Mexico, where Type IV Portland cement has not been produced after 1950. For dam construction this type has been replaced mainly by Type II (modified) cement or, in the second place, by pozzolanic and Portland-Blast furnace cements with low C_3A content in the clinker.

It should be borne in mind that by lowering the initial temperature of concrete and by using suitable cooling system to control temperature gradients in concrete structures it might be possible to obtain equal and sometimes greater technical and/or economical advantages than by the use of a low-heat cement which may be difficult to obtain and thus also expensive.

5.3. Cements for use in hot or cold climates

The relationship between the temperature of concrete and the rate of hydration of cement is fairly well known from many investigations. Higher temperature during placing and setting of concrete will speed up the chemical reactions of hydration and thus affect beneficially the early strength of concrete. On the other hand, this effect may be different from about seven days onwards, resulting in relatively lower strengths at a later age. In addition, high concrete temperature will increase the rate of stiffening of fresh concrete and generally result in increased water demand. Therefore it is recommended that site tests should be made before construction is begun in a new – especially hot and dry – climate.

As to the selection of cement, it seems that the types of cement with a slow or at least moderate rate of hardening (i.e. types with a low early rate of heat evolution) are to be preferred for work in hot climates, in order to reduce the tendency to excessive temperature rise of concrete. The use of cements containing a high proportion of finely ground blastfurnace slag would give the additional advantage of avoiding the risk of false set and providing for good water retention.

With regard to cements for concrete work in cold climates, reference is made to Section 3.7 in which some points of view concerning the sensitivity of cement to the effects of low temperature are discussed.

6. SUMMARY

A survey concerning the types of cements now available for use in concrete for large dams has resulted in the compilation of Tables 1 and 2 in which the classification given in the ISO Recommendation R 597 has been followed as far as possible. Owing to various differences in cement specifications Tables 1 and 2 represent a compromise which is offered mainly as a basis of discussion of various aspects in the choice of cement type for a specific purpose. It should be noted that included in these tables are cements which normally would not be used in concrete for large dams, although their use for special work in connection with dam building may be necessary and justified. Attention must also be drawn to the fact that cement specifications are subject to a continuous evolution.

The applicability of a cement should be assessed on the results of tests on concrete made with the cement or cements to be investigated. The tests included in the cement

répondre à ces normes. Par ailleurs, pour certains problèmes concernant la pérennité chimique du béton, il peut être intéressant de connaître la composition du ciment et ce paramètre peut jouer un rôle dans le choix.

Ce choix ne doit pas être considéré comme un détail mineur, indépendant; bien au contraire il doit s'inscrire dans le problème plus général de la conception de l'ouvrage en béton. Dans ces conditions, outre les caractéristiques propres du ciment, il faut tenir compte des variations éventuelles qui peuvent être apportées au projet, les différentes sources de granulats, et les méthodes d'exécution (par exemple, dispositifs de refroidissement, entr'axes des joints, etc.), dans une approche d'ensemble, afin d'aboutir à une solution équilibrée sur le plan technique et économique.

Le tableau 2 précise l'influence du ciment sur certaines caractéristiques du béton. Compte tenu de la variabilité de la production des cimenteries, aucune valeur quantitative n'est donnée. Il faut procéder à des essais de laboratoire sur échantillons de béton pour pouvoir comparer et pour obtenir des informations détaillées sur les caractéristiques des différents ciments.

Pour les essais de résistance mécanique, il est important de rechercher les valeurs de résistance initiales pour une enveloppe de températures (normale, faible, élevée) ainsi que le niveau de résistance et le gain de résistance par la suite. Pour la chaleur d'hydratation, il est recommandé que son évolution soit déterminée sur un échantillon pris dans le même béton utilisé pour les essais de résistance mécanique.

Pour l'appréciation du risque de fissuration, l'essai de retrait empêché serait plus représentatif que l'essai classique de retrait libre, mais il reste à mettre au point un ensemble d'essais cohérent. A ce sujet, il faut se pencher également sur l'extensibilité du béton dont dépend la fissuration en fonction du niveau des tractions dans le béton.

En ce qui concerne la résistance au lessivage et aux sulfates, il serait possible, dans la plupart des cas, de baser la décision sur une connaissance de la composition chimique du ciment, même s'il est parfois nécessaire de procéder à des essais.

TABLEAU 3. – ÉCHELLE DES APPRÉCIATIONS UTILISÉE DANS LE TABLEAU 2

Vitesse de durcissement :	Très rapide	Rapide	Moyenne	Assez lente	Lente	Très lente
Résistance initiale :	Très élevée	Élevée	Moyenne	Faible	Très faible	
Gain de résistance à 28 jours :	Négligeable	Léger	Moyen	Grand	Très grand	
Chaleur initiale :	Très élevée	Élevée	Assez élevée	Moyenne	Faible	Très faible
Résistance au lessivage et résistance aux sulfates :	Médiocre	Assez médiocre	Moyenne	Bonne	Très bonne	
Sensibilité aux basses températures :	Très sensible	Sensible	Moyenne	Presque nulle	Nulle	
Possibilité d'utilisation pour les barrages en béton :	Non	Éventuellement	Moyenne	Bonne	Excellente	

specification serve mainly the purposes of cement manufacture and ensure compliance with the requirements of the relevant specifications. On the other hand, for certain problems of the chemical durability of concrete the compound composition of the cement is of interest and may influence the choice of the proper type of cement to be used for a specific application.

In addition, the selection of the most suitable type of cement or the choice between two or perhaps more cements available should not be regarded as an isolated detail, but as forming a part of the whole problem of realizing a concrete structure. Therefore in addition to the characteristics of the cement the possible variations in the design principles, alternative aggregate sources, and in the details of the construction procedures, for example cooling of concrete, spacing of joints, etc. should be considered together for arriving at a balanced solution of the technical and economic aspects of the project in question.

In Table 2 an outline of the influence of the listed types of cement on certain properties of concrete is given. Because of the variability of cements produced locally, no exact figures or values can be given. For the purpose of comparison and for detailed information on the properties of cements to be used in specific cases tests on concrete samples are recommended.

In strength tests it is of importance to find out the early strength values at normal and lower or higher temperatures as well as the strength level and the later strength gain. As to the heat of hydration it is recommended that the heat evolution be determined using a concrete sample from the same mix as used for the strength tests.

For the assessment of the cracking tendency of cement the use of a restrained shrinkage test is considered to be more representative in this respect than the free shrinkage tests, although there is still need for the development of consistent test methods. In this connection attention should also be paid to the extensibility of concrete on which, together with the magnitude of the occurring tensile stress, the actual formation of cracks will depend.

As regards the resistance to leaching and sulphate attack it is suggested that consideration of the compound composition of cement will in most cases give a sufficient basis for decision, although the application of some of the test methods available might, in specific cases, be considered necessary.

TABLE 3. - APPROXIMATE RATINGS USED IN TABLE 2 FOR ASSESSMENT OF VARIOUS CHARACTERISTICS RELATING TO CONCRETE

Rate of hardening :	very rapid	rapid	moderate	fairly slow	slow	very slow
Early strength :	very high	high	moderate	low	very low	
Strength gain after 28 days :	negligible	small	moderate	considerable	great	
Early rate of heat evolution :	very high	high	fairly high	moderate	low	very low
Resistance to leaching and resistance to sulphate attack :	poor	fairly poor	moderate	good	very good	
Sensitivity to low temperature :	very sensitive	sensitive	moderate	fairly insensitive	insensitive	
Applicability for massive dams :	unsuited	conditional	usable	appropriate	well-suited	

7. REFERENCES

- [1] *Cements for Hydraulic Structures*. Study made by the Working Group on Concrete of the Swedish Committee of International Commission on Large Dams. Stockholm. 1969. 82 p.
- [2] ACI Committee 207. – Mass Concrete for Dams and Other Massive Structures. *ACI Journal*, April 1970, pp. 273-309.
- [3] ACI Committee 207. – Effect of Restraint, Volume Change, and Reinforcement on Cracking of Massive Concrete. *ACI Journal*, July 1973, pp. 445-470.
- [4] ACI Committee 223. – Expansive Cement Concretes – Present State of Knowledge. *ACI Journal*, August 1970, pp. 583-610.
- [5] ACI Committee 223. – Recommended Practice for the Use of Shrinkage-Compensating Concrete. *ACI Journal*, June 1976, pp. 319-339.
- [6] ACI Committee 224. – Control of Cracking in Concrete Structures. *ACI Journal*, December 1972, pp. 717-752 (Chapter 7, pp. 736-745, in particular).
- [7] ACI Publication SP-38. – Klein Symposium on Expansive Cement Concretes, 1973. 491 p.
- [8] ADAM M. – *Guide pratique pour l'emploi des ciments*, Editions Eyrolles, Paris 1973. 65 p.
- [9] Anonymous. – Special cements and their uses, *Concrete Construction*, Jan. 1973, pp. 3-7.
- [10] Cement Research Institute of India. – *Cement Standards of the World*, Third Edition, New Delhi, 1973, 44 p.
- [11] CZERNIN W. – *Cement Chemistry and Physics for Civil Engineers*. Chemical Publishing, New York, 1962, 139 p.
- [12] CHUJO K. & KONDO M. – On the Shrinkage of Several Kinds of Cement used in Concrete for Dams. *ICOLD 7th Congress on Large Dams*, Rome, 1961, Proc. Vol. Communications, C. 3, pp. 1-16.
- [13] CORDON W.A. – Evaluation of Concrete and Mortar Mixes. *ACI Journal*, Jan. 1960, pp. 569-580.
- [14] CORDON W.A. & THORPE J.D. – Proportioning and Evaluation of Concrete Mixtures. *ACI Journal*, February 1975, pp. 46-49.
- [15] De SOUSA COUTINHO A. – The Influence of the Type of Cement in its Cracking Tendency. Rilem Symposium, *Bulletin RILEM*, No 5, Dec. 1959, pp. 26-40.
- [16] DREUX G. – *Connaissance du Béton*. Société de Diffusion des Techniques du Bâtiment et des Travaux Publics, Paris, 1964, 145 p.
- [17] FORRESTER J.A. – A Conduction Calorimeter for the Study of Cement Hydration. *Cement Technology*, May/June 1970, pp. 95-99.
- [18] GAUTIER E., VENUAT M. & VOLANT J. – Influence de la nature du ciment, des adjuvants et de la température initiale sur l'échauffement du béton en grande masse. Communication C 10, *ICOLD, 12th Congress on Large Dams*, Mexico City, 1976, Proc. Vol. IV, pp. 935-955.
- [19] GOSSCHALK E.M. & BROOK K.M. – Methods of Determining Effects of Shrinkage, Creep and Temperature on Concrete for Large Dams. *ICOLD Bulletin No 26*, Jan. 1976, 52 p.
- [20] HELLSTRÖM B. – Experiences Arising from the Testing and the Actual Use of Special Cements for Large Dams. General Report, Question No 11. *ICOLD, 3rd Congress on Large Dams*, Stockholm, 1948, Proc. Vol. II, pp. 983-1255.
- [21] HOUGHTON D.L. – Determining Strain Capacity of Mass Concrete. *ACI Journal*, December 1976, pp. 691-700.
- [22] HOUK I.E., BORGE O.E. & HOUGHTON D.L. – Studies of Autogenous Volume Change in Concrete for Dworshak Dam. *ACI Journal*, July 1969, pp. 560-568.
- [23] ICOLD, Committee on Concrete. – Guide and Recommendations for Tests on Surface-Active Admixtures for Concrete for Large Dams. *ICOLD Bulletin No 20*, 1968, 29 p.

- [24] ICOLD, Committee on Concrete for Large Dams. – Guide and Recommendations on Pozzolanas and Slags for Use in Concrete for Large Dams. *ICOLD Bulletin No 22*, March 1972, 12 p.
- [25] ICOLD, Committee on Concrete and Committee on Materials for Large Dams. – Guide and Recommendations for Accelerating and Retarding Admixtures for Use in Concrete for Large Dams. *ICOLD Bulletin No 24*, June 1973, 28 p.
- [26] ISO Recommendation R 597. – *Definitions and Terminology of Cements*. 1st Ed. August 1967, 7 p.
- [27] JOISEL A. – *Les fissures du ciment*. Editions STAR, Paris, 1961, 172 p.
- [28] KIEGER P. – Regulated-Set Cements – Material Properties. Proc. of Conference on *New Materials in Concrete Construction*, University of Illinois at Chicago Circle, Chicago III., Dec. 1971, pp. VI/1-17.
- [29] KREJGER P.C. – Influence of the Concrete Composition on the Shrinkage of Hydraulic Concretes, General Report, RILEM/CEMBUREAU, *Int. Colloquium on the Shrinkage of Hydraulic Concretes*, Madrid, 1968, Proc. Vol. III, pp. V-B/1-12.
- [30] LEA F.M. – *The Chemistry of Cement and Concrete*. 3rd Edition, Edward Arnold Ltd, London, 1970, 727 p.
- [31] LEE C.R. & LAMB W. – Effects of Various Factors on the Extensibility of Concrete for Large Dams. *ICOLD Bulletin No 25*, February 1976, 19 p.
- [32] MARY M. & CHAPPELLE J. – Frost Resistance of Concrete; Comparison of Results Obtained in Different Laboratories. *ICOLD Bulletin No 15*, 1960, 130 p.
- [33] MATHER B. – Developments in Specification and Control. *Transportation Research Record 525*, National Research Council Washington D.C., pp. 38-42.
- [34]
- [35] MEHTA P.K. & GJØRV O.E. – A New Test for Sulfate Resistance of Cements. *ASTM Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 2, No 6, 1974, pp. 510-514.
- [36] NEVILLE A.M. – *Properties of Concrete*. Sir Isaac Pitman & Sons Ltd, Second (metric) Edition, London, 1973, 686 p.
- [37] NEVILLE A. – *High Alumina Cement Concrete*. John Wiley & Sons, New York, 1975, 201 p.
- [38] OSBORNE G.J. & SMITH M.A. – Exploratory Studies of Regulated-Set Cements. *Cement Technology*, No 3/1974, pp. 335-354.
- [39] PERENCHIO W. – Regulated-Set Cements – Applications and Field Problems. Proc. of Conference on *New Materials in Concrete Construction*, University of Illinois at Chicago Circle, Chicago III., Dec. 1971, pp. VII/1-5.
- [40] PIRTZ D. – Improved Adiabatic Calorimeter for Concrete. *ASTM Materials Research and Standards*, Jan. 1962, pp. 22-25.
- [41] PRICE W.H. – The Practical Qualities of Cement. *ACI Journal*, Sept. 1974, pp. 436-444.
- [42] PRICE W.H. – Pozzolans – A Review. *ACI Journal*, May 1975, pp. 225-232.
- [43] RILEM Symposium, *Durability of Concrete, 1969*, Question C: Basic Questions, Principles and Methods of Testing, and Determination of Concrete Durability under the Action of Sulphates and Acids. Preliminary Report, Part II, pp. C-3 to C-445, and Final Report, Part II, pp. C-5 to C-244, Academia, Prague, 1969 and 1970.
- [44] ROBERTS C.M. – Cement Variations as Affecting Cracking in Large Dams. Report R. 11, Question No 15, ICOLD, *4th Congress on Large Dams*, New Delhi, 1951, Proc. Vol. III, pp. 129-154.
- [45] SAVAGE J.L. – *Special Cements for Mass Concrete*. US Bureau of Reclamation, Denver Colo. 1936, 230 p.
- [46] SAVAGE J.L. – Special Cements, General Report. Question No. 3, ICOLD, *2nd Congress on Large Dams*, Washington D.C. 1936, Proc. Vol. I, pp. 203-217.
- [47] TUTHILL L.H. & ADAMS R.F. – Cracking Controlled in Massive Reinforced Structural Concrete by Application of Mass Concrete Practices. *ACI Journal*, August 1972, pp. 481-491.

- [48] VENUAT M. & PAPADAKIS M. – *Contrôle et essais des ciments, mortiers, bétons*. Edition Eyrolles, Paris 1961, 465 p.
- [49] Vorläufiges Merkblatt für die Messung der Temperaturerhöhung des Betons mit dem adiabatischen Kalorimeter. Fassung, December 1970. *Beton* Nr. 12/1970, pp. 545-549.
- [50] VUORINEN J. – Thermos-Calorimeter for Concrete in Evaluation of Cements as to Heat Evolution. ACI Publication SP-34, *Concrete for Nuclear Reactors*, Vol. II Detroit Mich. 1972, pp. 1037-1046.
- [51] Highway Research Record 45, *Symposium on Alkali-Carbonate Rock Reaction*, Highway Research Board, National Research Council, Washington D.C., 1964.
- [52] FRISTRÖM G. & SÄLLSTRÖM S. – Control and Maintenance of Concrete Structures in Existing Dams in Sweden. ICOLD *9th Congress on Large Dams*, Istanbul, 1976, Question 34, R. 22, pp. 383-401 (in particular Section 4 - Special investigations concerning the effect of leaching, pp. 392-397).
- [53] HOUGHTON D.L. – Concrete Strain Capacity Tests - Their Economic Implications. *Proc. Engineering Foundation Conference on Economical Construction of Concrete Dams*, Pacific Grove, California, May 1972, Publ. Am. Soc. of Civil Engineers, New York, N.Y.
- [54] Corps of Engineers, U.S. Army CRD-C38-73. – *Method of Tests for Temperature Rise in Concrete*, Handbook for Concrete and Cement, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss.
- [55] ACI Committee 201. – Guide to Durable Concrete. *ACI Journal*, December 1977, pp. 573-609.
- [56] De la O, F.B. – Alkali-Aggregate Expansion Corrected with Portland - Slag Cement. *ACI Journal*, March 1951, pp. 545-552.
- [57] GRIEB W.E. & WERNER G. – Final Report of Tests of Concrete containing Portland Blast furnace Slag Cement. *Public Roads*, Vol. 31, No. 9, August 1961, pp. 183-193.
- [58] COX H.P., COLEMAN R.B. & WHITE L. – Effect of Blast furnace Slag Cement on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete. *Pit and Quarry*, Vol. 43, No. 5, November 1950, pp. 95-96.
- [59] SPRUNG S. – Einfluss von Zement und Zusätzen auf die Alkali-reaktion. *Schriftenreihe der Zementindustrie*, Heft 40/1973, Vorbeugende Massnahmen gegen Alkalireaktion im Beton. Beton-Verlag, Düsseldorf, 1973, pp. 69-78.
- [60] VENUAT M. – *La pratique des ciments et des bétons*. Editions du Moniteur des Travaux Publics et du Bâtiment, Paris 1977, 632 p.

Voici une série de Rapports et de Guides publiés par le Comité Béton et le Comité des Matériaux de la Commission internationale des Grands Barrages.

This is one of a series of Reports and Guides issued by the Committee on Concrete and the Committee on Materials of the International Commission on Large Dams as follows :

Report on frost resistance of concrete and on the definition of concrete mixes. Extract from the proceedings of the 5th Congress on Large Dams, Paris, 1955.

Bulletin No. 12, 1958, "A contribution to the analysis of arch dams", by Nikola Hajdin, Yugoslavia.

Bulletin No. 15, 1960, "Frost resistance of concrete", by Marcel Mary and Jules Chappelle, France.

Bulletin No. 18, 1965, "Guide and recommendations on aggregates for concrete for large dams".

Bulletin No. 20, 1968, "Guide and recommendations for tests on surface-active admixtures for concrete for large dams".

Bulletin No. 22, 1972, "Guide and recommendations on pozzolanas and slags for use in concrete for large dams".

Bulletin No. 24, 1973, "Guide and recommendations for accelerating and retarding admixtures for use in concrete for large dams".

Bulletin No. 25, 1975, "Report on effects of various factors on the extensibility of concrete for large dams".

Bulletin No. 26, 1976, "Report on methods of determining effects of shrinkage, creep and temperature on concrete for large dams".

ANNEXE I

NOTE SUR L'UTILISATION DES CIMENTS PORTLAND À FAIBLE CHALEUR D'HYDRATATION EN SUÈDE

(préparée par le Comité Suédois, 1976)

Introduction

Dans son rapport *Ciments utilisés pour le béton des grands barrages*, M. Vuorinen fait mention des études et des expériences suédoises dans le domaine de l'utilisation des ciments Portland à faible chaleur d'hydratation. La présente note donne quelques précisions à cet égard.

Utilisation des ciments à faible chaleur d'hydratation

Depuis les années trente, en Suède, on utilise ces ciments pour la construction des ouvrages massifs (barrages...) afin de réduire la fissuration thermique pendant et après le durcissement du béton. La réduction du risque de fissuration avec ces ciments (en comparaison avec le ciment Portland ordinaire) est maintenant prouvée aussi bien par les expériences pratiques que par les études en laboratoire.

Cependant, un inconvénient des premiers ciments de ce genre concernait son broyage grossier. Il en résultait un ressuage important pouvant gêner la maniabilité et la fluidité (pompage) du béton. De plus, on constatait parfois des tassements du béton frais après mise en place et compaction, nécessitant un faible rythme de travail. En effet, les normes limitaient les coulées à 25 cm/heure maximum.

On constata également une certaine fissuration, malgré la réduction apportée. Ces fissures donnaient naissance à des problèmes de fuites et de lessivage de la chaux.

Progrès récents

Au cours des années soixante, un groupe de travail du Comité Suédois a étudié les possibilités d'amélioration des caractéristiques du ciment à faible chaleur d'hydratation. Les ciments à laitiers et à pouzzolanes, également utilisables, étaient inscrits dans cette étude. Le rapport fut publié en 1969 [réf. 1, bibliographie principale].

Les conclusions de cette étude étaient les suivantes :

- La maniabilité et la fluidité du béton confectionné avec un ciment à faible chaleur d'hydratation peuvent être largement améliorées par un broyage plus fin du ciment.
- Pour conserver la caractéristique de faible chaleur d'hydratation malgré ce broyage plus fin, on peut modifier le dosage des ingrédients : augmentation du rapport C_3S : C_3A , et réduction de la teneur en C_3A (voir ci-dessous).

APPENDIX I

NOTES ON THE USE OF LOW HEAT PORTLAND CEMENTS IN SWEDEN

(by the Swedish Committee on Large Dams, 1976)

Introduction

In his report on *Cements for Concrete for Large Dams* Dr. Vuorinen refers (in certain parts) to studies and experiences on the use of Low Heat Portland cements in Sweden. As regards these experiences, some further information is given in the following.

Use of low heat cement

In Sweden a Low Heat Portland cement has been used since the 1930's for dams and other massive structures in order to prevent excessive cracking due to temperature effects during and after hardening. The advantage of LH cement as regards the much lower cracking tendency compared with ordinary Portland cement has been clearly demonstrated in the field as well as in extensive laboratory tests.

However, one rather unfavourable feature of the early LH cement proved to be its comparatively coarse grinding. This gave the concrete a very marked bleeding tendency which could impair the concrete workability and pumpability. The bleeding could also cause settlement in the fresh concrete after placing and compacting, which necessitated the use of a very low rate of casting. A maximum rise of 25 cm per hour was normally specified for this reason.

Other experiences indicated that although the risk of cracking was greatly reduced by the use of LH cement, some cracks would still develop, causing problems with leakage and leaching of lime.

Recent development work on low heat cement

During the 1960's a working group within the Swedish Committee on Large Dams studied the possibilities of improving the properties of the LH cement, including also slag and pozzolan cements as alternatives to LH Portland cement. A report on this work was presented in 1969 [ref. 1, to Dr. Vuorinen's report].

It was concluded that :

- The workability and pumpability of concrete with LH Portland cement could be greatly improved by a finer grinding of the cement.
- The desirable low heat development could also be maintained in spite of the finer grinding, by a further modification of the main cement components, increasing the ratio $C_2S : C_3S$, and decreasing C_3A (see below).

Il fut même possible de diminuer encore la chaleur et ce, malgré un broyage très fin. Un ciment de ce type « à très faible chaleur d'hydratation » fut fabriqué en prototype par la Cimenterie de Gullhøgen.

Utilisation du ciment à très faible chaleur d'hydratation

Dans les premières années de la présente décennie, l'Entreprise Nationale d'Électricité en Suède (Swedish State Power Board) commençait à utiliser ce ciment pour les ouvrages massifs (usines nucléaires, usines hydroélectriques), afin de réduire au maximum le risque de fissuration dû aux contraintes thermiques et de réduire ainsi les armatures prévues à cet effet.

Caractéristiques

L'analyse chimique de ces deux types de béton est la suivante (en pourcentage) :

	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	Rapport C ₂ S : C ₃ S
Très faible chaleur (Gullhøgen)	19	60	0	18	3.1
Faible chaleur (Limhamn)	36	49	0	12	1.4
Faible chaleur (avant 1970)	42	43	3	10	1.0

La finesse (ou surface spécifique) donnée par Lea & Nurse ainsi que la chaleur d'hydratation mesurée par la méthode de dissolution sont les suivantes :

	Surface spécifique dm ² /gr	Chaleur d'hydratation (cal/gr)	
		3 jours	7 jours
Très faible chaleur (Gullhøgen)	41	36	44
Faible chaleur (Limhamn)	37 ⁽¹⁾	46	56
Normale (faible chaleur)	–	50	60

(1) Au cours des années soixante, < 30 dm²/gr.

L'examen du tableau ci-dessus indique que le ciment à très faible chaleur d'hydratation, malgré sa finesse supérieure, libère moins de chaleur (– 20 à – 25 %) au cours des premiers jours que le ciment à faible chaleur d'hydratation. Ce faible rythme d'échauffement est également indiqué par la valeur très élevée du rapport C₂S : C₃S.

Cette caractéristique est également illustrée dans la figure 1 établie à partir de mesures de températures faites dans un calorimètre thermos modifié (échantillon : pâte de ciment; c/e 2,5; dosage en ciment : 1 000 gr). Cet essai simple et rapide fournit d'excellents renseignements sur l'évolution de la chaleur en fonction du ciment utilisé (voir par. 3.3 du rapport). De plus, il donne indirectement des indications sur la vitesse du durcissement (fig. 2).

Les figures 2 et 3 montrent l'évolution de la résistance du béton confectionné avec un ciment à très faible chaleur d'hydratation. La très faible vitesse de durcissement par

It also proved possible to decrease the heat development below that of the original LH cement at a very fine grinding of the cement. A cement of this type with extra low heat development (ELH) was manufactured on a trial basis by the Gullhøgen cement factory.

Use of extra low heat cement

At the beginning of the 1970's the Swedish State Power Board started to use ELH cement for massive structures in nuclear as well as hydro-electric power plants. The purpose was to reduce further the risk of cracking due to thermal stresses and decrease the amount of crack control reinforcement.

Properties of ELH cement

The chemical composition as regards the principal components of ELH and LH cement is given below as percentages.

	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	C ₂ S : C ₃ S
ELH (Gullhøgen)	19	60	0	18	3,1
LH (Limhamn)	36	49	0	12	1,4
LH (before 1970)	42	43	3	10	1,0

The fineness or specific surface according to Lea & Nurse and the heat development measured by the solution method are as follows :

	Spec. surface dm ² /g	Heat development (cal/g)	
		3 days	7 days
ELH (Gullhøgen)	41	36	44
LH (Limhamn)	37 ⁽¹⁾	46	56
Standard requirement for LH	–	50	60

(1) In the 1960's < 30 dm²/g.

The table shows that ELH cement, despite its greater fineness, develops 20-25% less heat during the first days compared with LH cement. The slow heat of hydration is also indicated by the very high ratio between C₂S and C₃S.

The heat development of ELH-cement in relation to other cements is further demonstrated by Figure 1 which shows the temperature development of cement paste with w/c ratio 0,40 in modified thermos calorimeter tests using 1 000 g of cement. With reference to point 3.3 in Dr. Vuorinen's report it may be stated that this simple test method can give good and quick information as to the rate of heat development of various cements. It may also indicate indirectly the rate of hardening as shown in Figure 2.

The strength development of concrete with ELH cement is shown in Figures 2 and 3. The very slow rate of hardening in comparison with other cements is emphasized by

rapport aux autres ciments est évidente dans la figure 2 (résistance en fonction du facteur de maturité : $\Sigma \text{ jours} \times (t + 10 \text{ }^\circ\text{C})$, t étant la température du béton).

Il est également évident que le temps de cure humide d'un béton à ciment à très faible chaleur d'hydratation est nettement plus long que pour un béton à ciment à faible chaleur, voir figure 3. Avec ce ciment également, il faut protéger le béton plus longtemps contre le gel.

Expériences pratiques de l'utilisation du ciment à très faible chaleur d'hydratation

Ce ciment est utilisé pour un volume total de béton de plus de 60 000 m³ de béton, permettant de tirer les conclusions suivantes :

- Par rapport aux ciments grossiers initiaux (surface spécifique inférieure à 30 dm²/gr), le ciment à très faible chaleur d'hydratation, beaucoup plus fin, donne un béton d'une maniabilité et d'une fluidité très accrues, malgré le raidissement parfois observé.
- Le risque de fissuration thermique pendant le durcissement semble très réduit, et aucune fissuration n'a été observée. Les échauffements relevés sur les chantiers fournissent la preuve que la chaleur dégagée est très faible. Par rapport aux ciments à faible chaleur ordinaires, la température maximale est réduite d'environ 5 ou 6 °C pour un dosage donné (voir fig. 4).
- La lenteur de gain de résistance a créé des problèmes, notamment en campagne d'hiver lorsque des dispositions longues et onéreuses sont nécessaires pour assurer la cure et protéger le béton en cours de durcissement contre le gel, etc. Cette protection est parfois difficile, et dans ces cas, les risques de dégâts (usure, gel, impact) s'étalent sur une période plus longue. Dans certains cas, on a constaté des dégâts superficiels.

Conclusions

Ces problèmes pratiques de cure et de protection ont remis en cause l'utilisation du ciment à très faible chaleur d'hydratation. L'utilisation de ce ciment est recommandable seulement pour les cas spéciaux dans des conditions climatiques favorables. Cette restriction a réduit le domaine d'application jusqu'au point où la production a été interrompue.

Parallèlement, il a été possible d'apporter d'importantes améliorations aux caractéristiques du type normal de ciment à faible chaleur d'hydratation suivant les recommandations du rapport de 1969. Ce ciment est actuellement livré très fin, éliminant les problèmes de ressuage et de maniabilité.

On s'intéresse toujours à la possibilité d'obtenir un ciment dont l'évolution de la chaleur serait plus lente que celle de ce type normal, dans la mesure où le rythme de gain de résistance n'en souffre pas.

Compte tenu des augmentations récentes du prix de l'énergie, et la nécessité de réutiliser les laitiers produits par les sidérurgies, on s'oriente actuellement vers un ciment à laitier à faible chaleur d'hydratation, et cette possibilité est à l'étude.

Stockholm, octobre 1976.

Stig Sällström.

Figure 2 which gives the strength as a function of the maturity factor, $\Sigma \text{ days} \times (t + 10 \text{ }^\circ\text{C})$, when t is concrete temperature.

It is also obvious that the time required for moist curing of concrete with ELH-cement is considerably longer than for concrete with normal LH-cement, which is further illustrated by Figure 3. The curing requirement concerning the protection time before freezing during winter conditions must also be considerably extended for concrete with ELH cement.

Practical experiences of ELH cement

ELH cement has been used in the field for more than 60 000 m³ of concrete. The practical experiences may be summarized as follows.

- Compared with the originally coarse ground LH cement (specific surface less than 30 dm²/g) the ELH cement with its much greater fineness has provided concrete with considerably better workability and pumpability although a tendency for rapid loss of slump has been observed in certain cases.
- The risk of cracking due to thermal stresses during and after hardening seems to have been considerably reduced and no cracks have been observed. The temperature rise has been measured in the field on several objects and has proved the very low heat development of ELH. The peak temperatures have been lowered by about 5 or 6 °C as compared with the usual LH cement at the same cement content, see Figure 4.
- The slow strength development has caused serious problems, especially during winter conditions when time-consuming and expensive measures must be taken to safeguard the curing of the concrete and to provide protection against early freezing etc. Sometimes this has been difficult to attain which has resulted in long periods when the concrete has been susceptible to wear or damage due to frost or mechanical attack. Surface damages of this kind have also been observed in certain cases.

Conclusions

The practical curing and protection problems have in fact necessitated a reconsideration of the use of ELH cement. It has been concluded that the use of this cement can only be recommended in special cases and under favourable climatic conditions. The basis for the use of this cement has thereby been reduced to such an extent that no further production is considered at present.

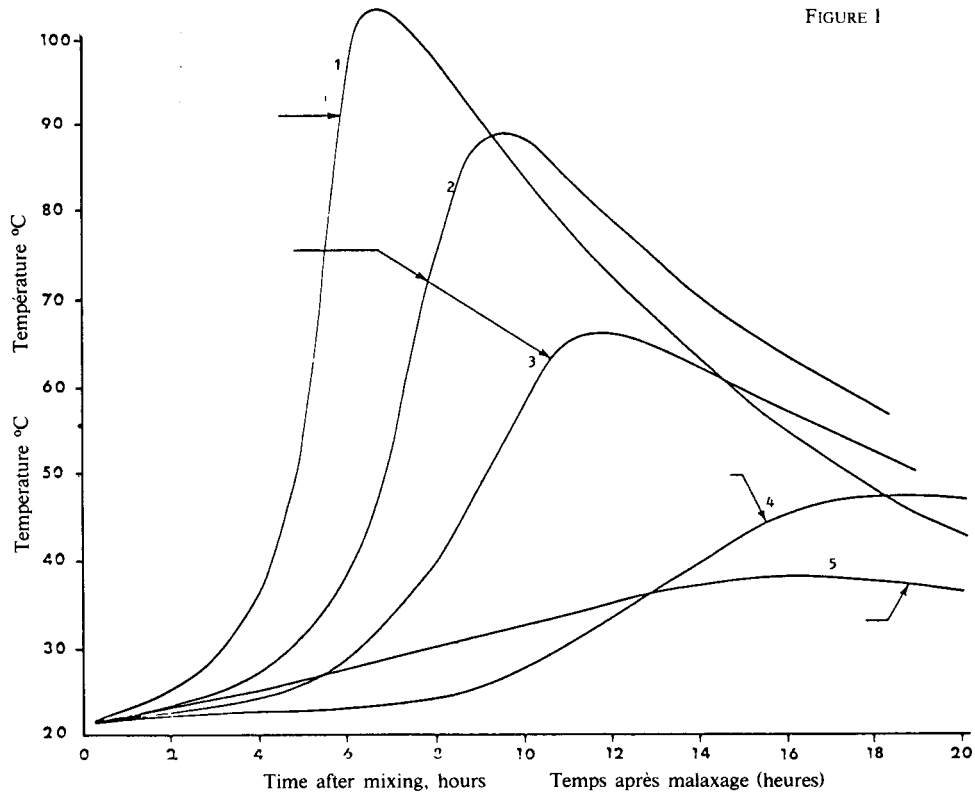
At the same it has proved possible to effect a considerable improvement in the properties of normal LH cement in accordance with the recommendation in the 1969 report. This cement is now also manufactured with great fineness, which has eliminated problems associated with bleeding and inferior workability.

Interest continues in the production of an LH cement with slower heat development than normal LH cement, but only provided this can be attained without any significant loss of strength development.

The changes, especially with regard to energy price levels in recent years and also the desirability of finding a suitable use for slag products from steelworks have directed interest towards Low Heat slag cement. The possible development of a slag cement of this type is now being studied.

Stockholm, October 1976.

Stig Sällström.



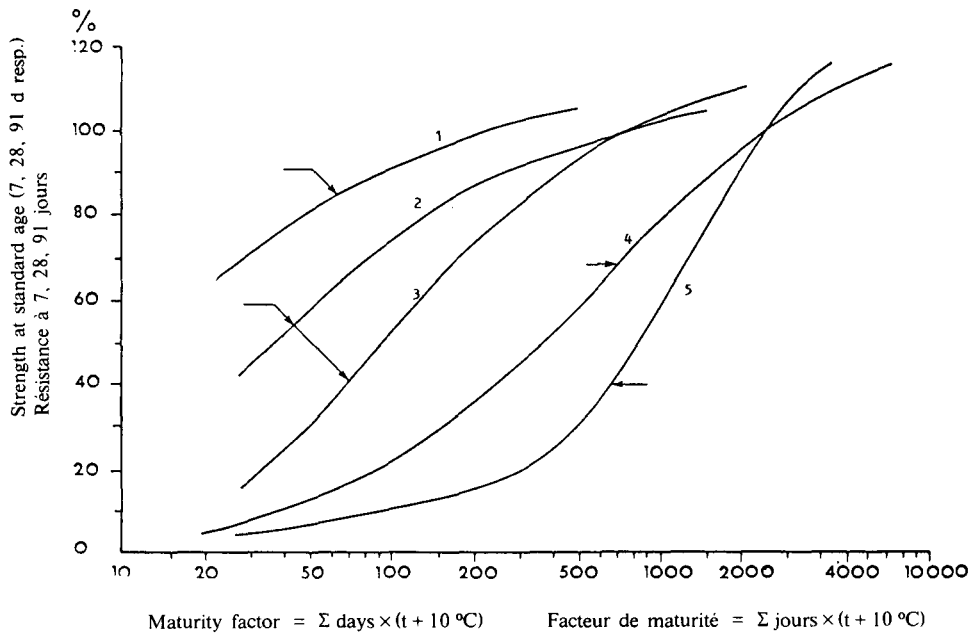
TEMPERATURE DEVELOPMENT FOR VARIOUS TYPES OF CEMENT IN THERMOS CALORIMETER WITH CEMENT PASTE (1 000 g cement w/c = 0,40)

1. Rapid hardening Portland cement
- 2-3. Ordinary P. cement (2 different brands)
4. Low Heat P. cement (LH)
5. Extra Low Heat P.C. (ELH)

ÉVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE DE DIVERS TYPES DE CIMENT. ESSAIS AU CALORIMÈTRE THERMOS SUR PÂTE DE CIMENT (1 000 g de ciment - Rapport C/E = 2,5)

1. Ciment Portland rapide
- 2-3. Ciment Portland artificiel (2 marques différentes)
4. Ciment à faible chaleur d'hydratation
5. Ciment Portland à très faible chaleur d'hydratation

FIGURE 2



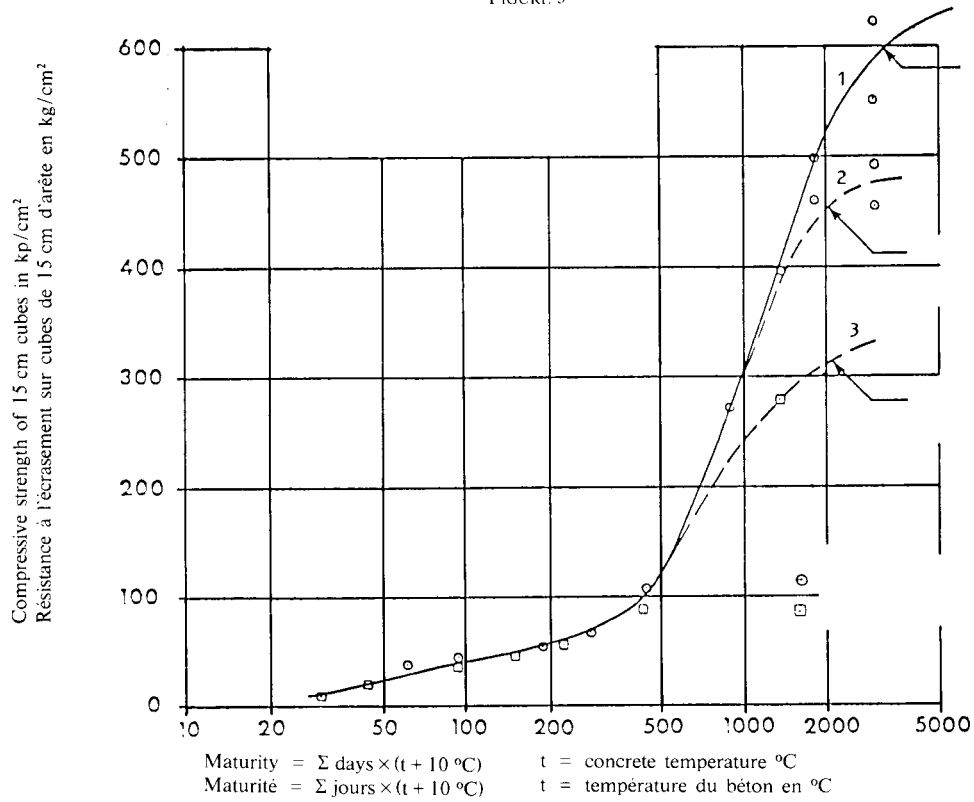
STRENGTH DEVELOPMENT FOR CONCRETE WITH VARIOUS TYPES OF CEMENT

1. Rapid hardening Portland cement
- 2-3. Ordinary Portland cement (2 different brands)
4. Low Heat P. cement (LH)
5. Extra Low Heat Portland cement (ELH)

ÉVOLUTION DE LA RÉSISTANCE DU BÉTON SELON LE CIMENT UTILISÉ

1. Ciment Portland prompt
- 2-3. Ciment Portland artificiel (2 marques différentes)
4. Ciment Portland à faible chaleur d'hydratation
5. Ciment Portland à très faible chaleur d'hydratation

FIGURE 3



STRENGTH DEVELOPMENT OF CONCRETE WITH ELH-CEMENT IN RELATION TO MATURITY AND MOIST CURING

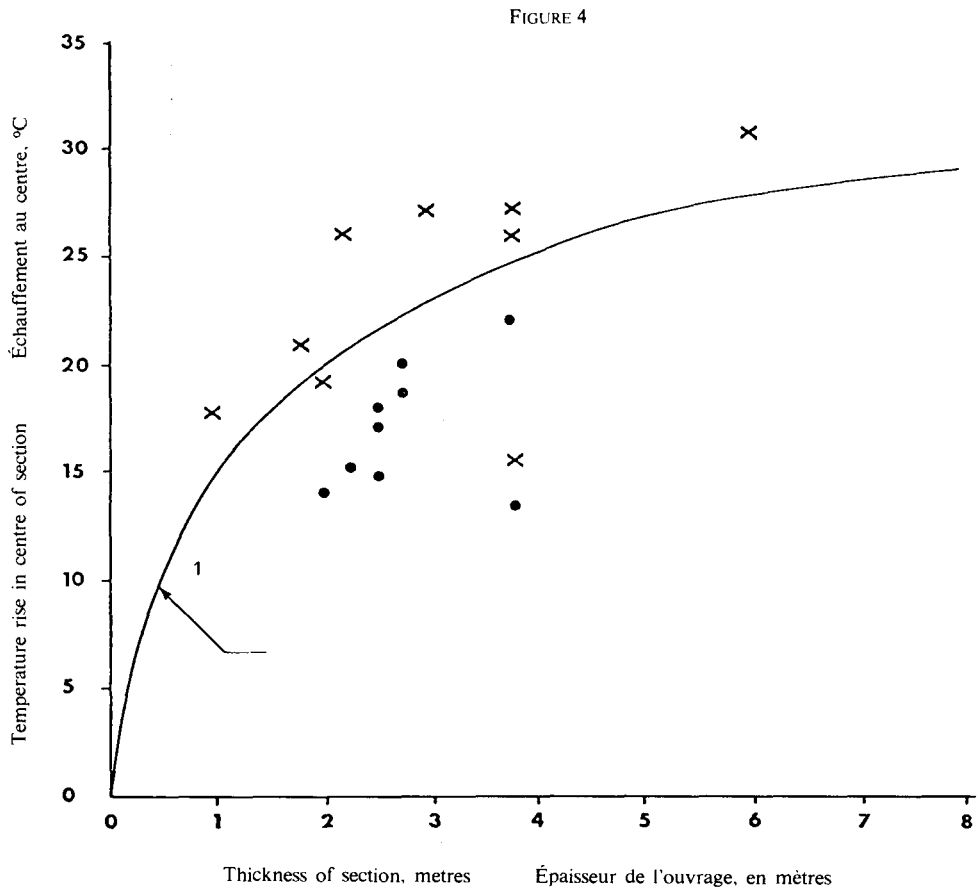
Cement content = 300 kg/m³
Max. aggr. size 32 mm
w/c 0,55
No air entrainment
⊙ Curing temperature 21 °C
⊠ Curing temperature 5 °C

1. Continuous moist curing
2. Moist curing until maturity (~900) thereafter curing in air
3. Moist curing until maturity (~450) thereafter curing in air

ÉVOLUTION DE LA RÉSISTANCE D'UN BÉTON AVEC CIMENT À TRÈS FAIBLE CHALEUR D'HYDRATATION EN FONCTION DE SA MATURITÉ ET DE L'HYGROMÉTRIE

Dosage = 300 kg/m³
Granulométrie maxi = 32 mm
C/E \approx 0,8 env.
⊙ Température 21 °C
⊠ Température 5 °C

1. Humidification permanente
2. Humidification jusqu'à maturité (~900) puis cure dans l'air
3. Humidification jusqu'à maturité (~450) puis cure dans l'air



MAXIMUM TEMPERATURE RISE IN MASSIVE CONCRETE SECTIONS

Cement concrete = 300 kg/m³

× Field observations for Low Heat Cement (LH)

• Field observations for Extra Low Heat Cement (ELH)

1. Calculated max for Low Heat Cement (Löfquist 1947)

ÉCHAUFFEMENT MAXIMAL EN OUVRAGES MASSIFS

Dosage 300 kg/m³

× Observations sur le chantier pour ciment à faible chaleur d'hydratation

• Observations sur le chantier pour ciment à très faible chaleur d'hydratation

1. Maximum calculé pour un ciment à faible chaleur d'hydratation (Löfquist 1947)

ANNEXE II

NOTE SUR LES CIMENTS RÉSISTANT AUX SULFATES ET SUR L'ÉLIMINATION DE LA RÉACTION ALCALI-GRANULAT

(préparée par le Comité Belge, 1978)

Introduction

Dans le rapport « Ciments utilisés pour le béton des grands barrages », il est fait mention de la résistance aux sulfates (par. 4.3) et de la composition du ciment en relation avec la réaction alcali-granulat (par. 4.4). Certaines indications dans les tableaux 1 et 2 traitent également de ces sujets.

Les précisions suivantes complètent le rapport en ce sens.

Ciments résistant aux sulfates

Parfois, l'eau entrant en contact avec le béton durci contient des ions de sulfates (SO_4^{2-}) de différentes origines (sol, dépôts, assainissement, pollution industrielle, oxydation des sulfures, décomposition biologique).

Ces ions entrent en réaction avec les hydrates de l'aluminate de calcium produits par l'hydratation de l'aluminate tri-calcique (C_3A) contenu dans le ciment, pour former « l'ettringite », ou « sel de Candlot ». Cette substance, riche en eau de cristallisation ($3 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$) occupe un volume plus important que les substances mères, avec, pour résultat, un gonflement du béton.

En cas d'une eau présentant une concentration en SO_4^{2-} supérieure à 400 ou 600 mg/l, ce gonflement peut être assez important pour provoquer des dégâts majeurs, ou même la rupture.

Pour conférer au béton une résistance à ce phénomène, on choisit un ciment spécial parmi la liste ci-dessous :

1. Ciment Portland à faible C_3A

a) ASTM C150-76a, type V

$\text{C}_3\text{A} < 5\%$

$\text{C}_4\text{AF} + 2\text{C}_3\text{A} < 20\%$

b) BS 4027 : 1966

$\text{C}_3\text{A} \leq 3,5\%$

c) DIN 1164 : 1970

$\text{C}_3\text{A} < 3\%$

$\text{Al}_2\text{O}_3 < 5\%$

2. Ciment de laitier

$$\frac{\text{laitier}}{\text{laitier} + \text{clinker}} > 70\%$$

APPENDIX II

NOTES ON CEMENTS RESISTANT TO SULPHATES AND FOR THE AVOIDANCE OF ALKALI-AGGREGATE REACTION

(By the Belgian Committee on Large Dams, 1978)

Introduction

In Section 4.3 of the report on "Cements for Concrete for Large Dams" reference is made to the resistance of cement to sulphate attack and Section 4.4 covers cement composition and alkali-aggregate reaction. Certain entries in Tables 1 and 2 of the report also deal with these subjects.

Further information is given below to supplement the report.

Cements resistant to sulphates

Water on contact with hardened concrete sometimes may contain sulphate ions (SO_4^{2-}) derived from the soil, dumps, sewage, industrial pollutants, oxidation of sulphides or biological decomposition.

The sulphate ions react with the calcium aluminate hydrates produced by the hydration of the tri-calcium aluminate (C_3A) in the cement to form "ettringite" also called "Candlot's salt". This compound, rich in water of crystallization, ($3 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$) has a greater volume than its component compounds and thus produces expansion in the concrete.

Water having an SO_4^{2-} concentration exceeding 400 to 600 mg/l may produce an expansion great enough to cause extensive damage or even failure.

To make a concrete resistant to attack from sulphates, a sulphate resisting cement should be chosen from the following :

1. *Portland cement low in C_3A*

a) to ASTM C150-76a, type V
 $\text{C}_3\text{A} < 5\%$
 $\text{C}_4\text{AF} + 2\text{C}_3\text{A} < 20\%$

b) to BS4027 : 1966
 $\text{C}_3\text{A} \leq 3,5\%$

c) to DIN 1164 : 1970
 $\text{C}_3\text{A} < 3\%$
 $\text{Al}_2\text{O}_3 < 5\%$

2. *Cement containing slag in the proportion*

$$\frac{\text{slag}}{\text{slag} + \text{clinker}} > 70\%$$

Elimination de la réaction alcali-granulat

Cette réaction est de deux sortes :

1. Alcali-silice
2. Alcali-dolomie

1) Réaction alcali-silice

Cette réaction se produit seulement lorsque les granulats contiennent de la silice sous forme sensible à l'action des alcalis, en présence d'une humidité suffisante. Les barrages constituent un cas spécial, car la grande masse de béton peut retenir l'humidité longtemps.

Quant à l'origine des alcalis actifs dans le béton, ils sont contenus principalement dans le ciment, mais aussi dans les adjuvants, les granulats ou l'eau de gâchage.

Ces alcalis peuvent également être apportés par l'eau entrant en contact avec le béton durci (eau de mer, certaines eaux usées...).

Pour les alcalis du ciment, on ne considère que ceux du potassium et du sodium. Ils sont souvent mesurés en « oxyde de sodium équivalent » :

$$\text{Na}_2\text{O équivalent (\%)} = \text{Na}_2\text{O (\%)} + 0,658 (\text{K}_2\text{O \%})$$

Pour être qualifié de ciment à faible teneur en alcalis, il faut :

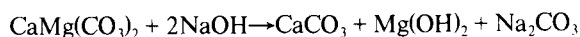
	Alcali Na ₂ O équivalent	Laitier	Pouzzolane
Ciment Portland	< 0,60 %	-	-
Ciment de laitier	< 1,10 %	> 50 %	-
	< 2,0 %	> 65 %	-
Ciment à pouzzolane	-	-	- *

* Les pouzzolanes peuvent contribuer à la réduction de la réaction alcali-granulat mais compte tenu de la variation de leurs caractéristiques, il est impossible d'indiquer une valeur sûre. Les mélanges ciment-pouzzolanes doivent être étudiés en laboratoire avant utilisation, par exemple à l'aide de l'essai ASTM-C 227-71 « Standard methods of test for potential alkali reactivity of cement-aggregate combinations ».

2. Réaction alcali-dolomie

Certaines dolomies ou calcaires dolomitiques utilisées comme granulats peuvent provoquer le gonflement du béton fabriqué avec un ciment à forte teneur en alcalis et en CaO (chaux).

Ce phénomène serait provoqué par la réaction suivante, dite « dédolomitisation » :



Cements to avoid alkali-aggregate reaction

Alkali-aggregate reaction can be of two types :

1. Alkali-silica reaction
2. Alkali-dolomite reaction

1) Alkali-silica reaction

This reaction is possible only if the aggregate contains silica in a form sensitive to the action of alkalis and if sufficient moisture is present. Dams are a particular case because, due to their large mass, they retain moisture for a long time.

The active alkali content of concrete comes mainly from the cement, but may also come from admixtures, the aggregates, or the mixing water.

Alkalies also may be introduced by alkali-containing water in contact with the hardened concrete, e.g. sea water and some waste waters.

The alkalis in the cement, normally taken into account, are the potassium and sodium alkalis. They are commonly quoted as the "equivalent sodium oxide" content, given by :

$$\% \text{ equivalent Na}_2\text{O} = \% \text{ Na}_2\text{O} (\%) + 0.658 (\% \text{ K}_2\text{O})$$

For a cement to be considered as "low alkali" it should conform to the following requirements :

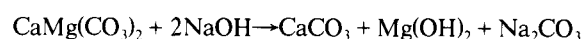
	Alkali content, Na ₂ O Equivalent	Slag content	Pozzolan content
Portland cement	< 0.60%	-	-
Slag cement	< 1.10%	> 50%	-
	< 2.0%	> 65%	-
Pozzolanic cement	-	-	- *

* Pozzolans may be useful in combating alkali-aggregate reaction but due to their varying properties it is not possible to give general guidance on the required percentage of pozzolan. Proposed cement-pozzolan mixtures should be tested before use, e.g. using ASTM-C 227-71. "Standard method of test for potential alkali reactivity of cement-aggregate combinations".

2. Alkali-dolomite reaction

Some types of dolomites or dolomitic limestones used as concrete aggregates can produce expansion of the concrete containing cements with high alkali and CaO (lime) contents.

This phenomenon is attributed to the following reaction, called "dedolomitization" :



Le Na_2CO_3 ainsi formé repasserait à l'état de NaOH par suite de la présence de Ca(OH)_2 (hydroxyde de calcium) produit par l'hydratation du ciment.

Cette réaction pourrait se poursuivre jusqu'à épuisement du Ca(OH)_2 .

La plupart des chercheurs pensent que le gonflement est dû à la formation de Brucite ou hydroxyde de magnésium (Mg(OH)_2), mais d'autres considèrent que les minces veines silicieuses des granulats provoquent une réaction du type alcali-silice.

Compte tenu de cette divergence d'opinions et le manque d'informations disponibles, il serait logique, pour éviter la réaction alcali-dolomie, de choisir un ciment à faible teneur en alcali parmi ceux énumérés ci-dessus (par. Réaction alcali-silice).

The Na_2CO_3 thus formed would revert to NaOH because of the presence of Ca(OH)_2 (Calcium hydroxide) produced by hydration of the cement.

This reaction might continue until all the Ca(OH)_2 is consumed.

A majority of research workers attribute the expansion to the formation of Brucite or magnesium hydroxide (Mg(OH)_2), while others think that thin siliceous veins in the aggregate give rise to alkali-silica reaction.

Due to this difference in opinion and the insufficiency of information, it would appear logical, in order to avoid alkali-dolomite reaction, to choose a low alkali cement from those given in the section on alkali-silica reaction.

IMPRIMERIE LOUIS-JEAN
Publications scientifiques et littéraires
05002 GAP — Tél. : (92) 51.35.23
Dépôt légal : 208 — Avril 1984

ISSN 0534—8293

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>