

Appréciation de la qualité du béton

Autor(en): **Stucky, J.-P.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin technique de la Suisse romande**

Band (Jahr): **84 (1958)**

Heft 15: **Problèmes actuels du béton, fascicule no 1**

PDF erstellt am: **21.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-63501>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

tiques. Là encore, il ne semble pas que des exemples précis aient apporté une démonstration probante du phénomène et je ne pense pas qu'il y ait beaucoup plus de différence, à cet égard, entre un portland et un ciment spécial (ayant chacun toujours une réaction franchement alcaline) qu'entre deux portland d'origines différentes, et l'on sait que sur les chantiers de béton armé les reprises en portland d'origines différentes ne sont pas si rares. Les phénomènes électrolytiques sont conditionnés par les phases aqueuses interstitielles et l'on peut penser que celles-ci s'homogénéisent rapidement au contact des deux bétons. Là encore la compacité du béton prend le pas sur la nature du ciment.

Conclusion

Au terme de cet exposé, je ne pense pas que, dans le domaine du génie civil et du bâtiment, sur lequel j'ai

voulu plus particulièrement mettre l'accent, le choix d'un ciment spécial s'impose fréquemment pour des raisons techniques; cette obligation est assez rare, mais alors impérieuse, et le choix du ciment est conditionné par un ensemble de facteurs particuliers.

Bien souvent, une bonne exécution du béton, la mise en œuvre de moyens de protection relativement simples, permettent d'utiliser le ciment portland pour des usages où les ciments spéciaux paraissent indiqués.

Mais réciproquement ces ciments peuvent très fréquemment et sans complication trop gênante se substituer au portland dans les emplois courants. C'est dans la mesure où cette substitution, actuellement commandée en France par des raisons économiques, se répandra, qu'il nous sera possible d'obtenir, en cas de nécessité, des ciments spéciaux, à des prix acceptables; mais on peut alors se demander si ce sont des ciments spéciaux.

APPRÉCIATION DE LA QUALITÉ DU BÉTON¹

par J.-P. STUCKY, ingénieur-conseil, Lausanne

1. Introduction

L'appréciation de la qualité du béton joue un rôle fondamental dans les ouvrages pour lesquels se pose un problème de sécurité, comme c'est le cas dans les barrages-voûtes actuels, dans les ponts de grande portée, et d'une manière générale dans les constructions hardies du génie civil qui caractérisent notre époque.

La première question qui se pose est de savoir si les propriétés du béton, étudiées avec soin sur des échantillons de dimensions restreintes, se retrouvent telles quelles dans l'ouvrage lui-même. Par la nature des choses, celui-ci sera en effet exécuté dans des conditions différentes: le coulage peut durer plusieurs heures, de sorte qu'une partie du béton commencera son durcissement tandis qu'une autre sera encore soumise à une intense vibration; les couches de béton frais peuvent atteindre plusieurs mètres d'épaisseur et donnent ainsi naissance à des phénomènes de capillarité inexistant dans un petit cube de 20 ou de 30 centimètres de côté.

Une deuxième question est de savoir si les sollicitations auxquelles on soumet les petits échantillons (compression uni-axiale, gélivité sur toutes les faces, etc.) sont comparables à celles de l'ouvrage (contraintes dans deux ou trois directions, gélivité sur une seule face).

C'est à ces deux questions, *dimension des échantillons de contrôle et mode d'application des sollicitations*, que je vais m'efforcer de répondre, en faisant la synthèse des observations recueillies sur quelques chantiers de barrages suisses. Ces chantiers sont en effet devenus depuis quelques années de remarquables champs d'expériences, tant par les moyens disponibles que par la continuité des essais, qui s'étendent souvent sur plusieurs campagnes successives. Bien que les barrages ne consomment que le cinquième de la production suisse du ciment (500 000 tonnes sur 2,5 millions, en 1957), ce sont eux qui donnent lieu aux études technologiques et aux contrôles les plus systématiques. La raison en

est facile à donner: la moindre économie s'applique à de très grands volumes et se traduit immédiatement par une diminution appréciable du coût des travaux. Mais, comme je m'efforcerai de le démontrer, cette économie ne s'obtient nullement aux dépens de la sécurité. On voit donc d'emblée le rôle que joue, aujourd'hui, l'*appréciation de la qualité du béton*, autrement dit l'extrapolation des résultats sur petits échantillons, pour juger du comportement réel de l'ouvrage.

2. Les critères de qualité d'un béton

Parmi les qualités que l'on doit exiger d'un béton, je citerai: la maniabilité, les résistances mécaniques, l'étanchéité, la résistance au gel et aux eaux agressives.

C'est intentionnellement que j'ai placé la *maniabilité* au début de cette énumération. En effet, seule une bonne maniabilité du béton permet de garantir, dans l'ouvrage, toutes les autres qualités que l'on s'est efforcé d'obtenir par des essais préliminaires sur petits échantillons. L'*essai de rupture en compression* est celui que l'on utilise le plus souvent comme critère de qualité du béton. Une éprouvette, sciée dans un bloc, ou moulée, est comprimée jusqu'à rupture entre deux plateaux d'une presse. L'*essai de traction directe* n'est pas facile à réaliser pour les gros bétons. On le remplace par l'*essai de flexion* qui donne, il est vrai, un chiffre de résistance plus grand que celui résultant de l'essai de traction directe; dans la pratique, on l'admet deux fois plus grand. Les *essais de gélivité et d'étanchéité* du béton sont complexes, en raison du nombre élevé de facteurs qui les influencent et de la difficulté que présente la reproduction en laboratoire des conditions réelles auxquelles l'ouvrage sera soumis. Enfin, le *module d'élasticité* est aussi un critère important de la qualité du béton.

3. Influence de la forme et de la dimension des éprouvettes

Il est connu que le cube, utilisé couramment dans l'essai de rupture en compression, donne une idée fautive

¹ Exposé fait aux « Journées d'études sur les problèmes actuels du béton ». Locarno 1958.

de la résistance réelle du béton. Des efforts de frottement apparaissent au contact du cube et des plateaux de la presse. Ces efforts sont différents, suivant le mode d'apprêtage des cubes. Ils dépendent de la vitesse de mise en charge, du type de presse, de la rigidité du cadre, du type d'articulation. Tous ces efforts parasites ont pour effet d'influencer la déformation transversale du béton, et par conséquent la rupture du cube. Mais la plupart de ces effets s'atténuent rapidement lorsque la hauteur de l'échantillon augmente, autrement dit lorsque le cube est remplacé par un prisme de même section.

Divers auteurs ont montré que, pour un rapport h/b (hauteur/base) croissant, le chiffre de résistance diminue rapidement entre $h/b = 0,5$ et $h/b = 1,5$. La figure 1 montre à quel point l'allure de cette variation

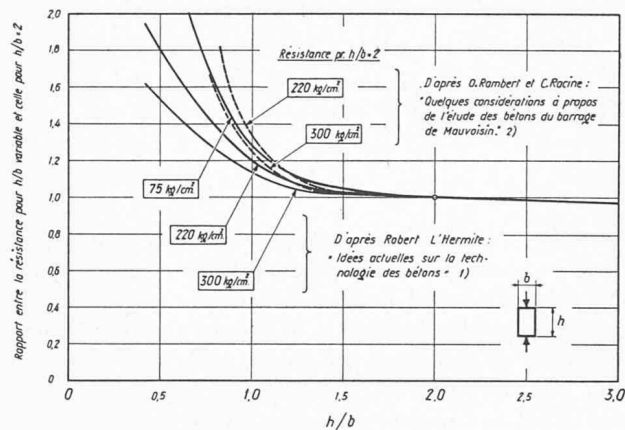


Fig. 1. — Influence du rapport h/b sur le chiffre de résistance du béton.

1. La « Documentation technique du bâtiment et des travaux publics ». 1955.
2. « Bulletin technique de la Suisse romande ». 17 mars 1956.

peut dépendre du mode de rupture : elle change d'un laboratoire à l'autre et dépend de la résistance elle-même. Au-delà de $h/b = 2$, le chiffre de résistance baisse encore légèrement, mais cette diminution est assez faible pour qu'on puisse ne plus en tenir compte dans la pratique du chantier. En conclusion, on voit que le prisme, ou mieux le cylindre, est la forme qui donnera le chiffre de résistance le plus voisin de la véritable résistance à la compression du béton. Pour ma part, je préfère le cylindre au prisme, car l'absence d'angles facilite la mise en place du béton et contribue à une meilleure répartition des efforts au moment de l'essai. De plus, le choix du cylindre moulé permet une comparaison intéressante avec les « carottes » de mêmes dimensions qu'il est facile d'extraire par forage de l'ouvrage achevé.

On sait que, pour un même béton, le chiffre de résistance diminue avec l'accroissement de la dimension des éprouvettes. Au-dessus des dimensions classiques de 20 ou 30 centimètres, il baisse encore considérablement (figure 2). Ce n'est qu'à partir de 1 mètre environ que la diminution devient négligeable. Mais il n'est pas question, bien entendu, d'adopter de telles dimensions pour le contrôle permanent d'un chantier. On en est donc réduit à choisir un compromis.

Les arguments qui précèdent nous ont conduits à mettre au point, pour le barrage de la Grande Dixence, puis

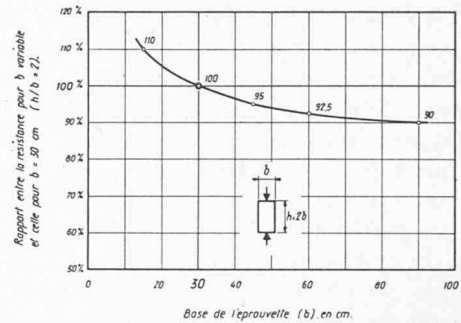


Fig. 2. — Influence de la dimension des éprouvettes sur le chiffre de résistance du béton.

Concrete Manual. Bureau of Reclamation.

pour ceux de Moiry et de Malvaglia, un essai systématique sur cylindres moulés de 30 centimètres de diamètre et de 45 centimètres de hauteur. Leur poids est de 80 kilogrammes, ce qui permet à deux personnes de les manipuler sans grandes difficultés. Le mode de prélèvement du béton et sa mise en moule ne sont pas sans importance. Je rappelle que l'on doit utiliser du béton complet, sans en éliminer tous les gros éléments, ce qui fausserait le chiffre de résistance. Pour un béton de barrage, on peut cependant éliminer, sans que les résultats en soient très influencés, les éléments de plus de 120 millimètres. En revanche, si on tamise le béton à 60 millimètres, le chiffre de résistance augmente, et, ce qui est plus grave, il augmente irrégulièrement (de 5, 10 ou 15 %) ; si on le tamise à 30 millimètres, le chiffre de résistance augmente de 15, 20 ou 25 %. La figure 3 représente schématiquement les barrages suisses achevés en 1957 ou en construction en 1958 : deux barrages-voûtes achevés, trois en construction dont un très important, celui de Luzzone (volume 1,25 millions de m^3) ; trois barrages-poids dont celui, bien connu, de la Grande Dixence (5,8 millions de m^3). Cinq de ces barrages ont été, ou seront contrôlés par des essais sur cylindres, fabriqués et conservés selon des méthodes identiques (même les presses sont identiques). On voit d'emblée tout le parti que l'on pourra tirer de l'ensemble des résultats, qui seront rigoureusement comparables entre eux. Aujourd'hui déjà, on dispose de plus de 8000 résultats d'essais sur cylindres.

4. Anisotropie du béton

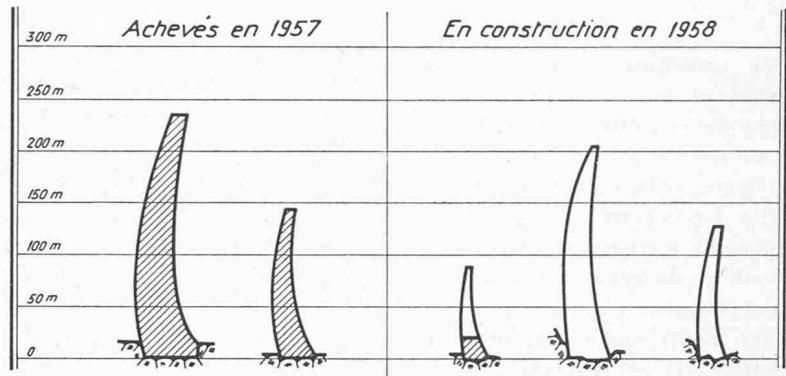
La mise en place de grandes quantités de béton met en évidence un phénomène tout à fait spécial : son manque d'homogénéité et son anisotropie. On sait que pendant la construction, les barrages sont découpés en plots verticaux, délimités par des coffrages sur toutes leurs faces, et coulés par tranches de 2 à 3 mètres d'épaisseur, ce qui correspond à la hauteur d'un panneau de coffrage, d'où leur nom particulier de levées (figure 4). Le coulage d'une levée dure plusieurs heures, 10, 12, et même 18 heures, et se fait par couches successives de 50 à 60 centimètres. Une de ces couches recouvre la précédente deux à quatre heures plus tard. La couche inférieure aura donc depuis longtemps commencé sa prise lorsqu'on procédera encore à la vibration de la dernière. Avant la prise du ciment, on rend la surface finale rugueuse au moyen de jets d'eau sous pression. Trois ou quatre jours plus tard, après avoir relevé

Barrages - voûtes

les coffrages, on bétonne une nouvelle levée. Voici donc une première et très fréquente interruption de la continuité du béton. Elle est particulièrement sensible entre deux campagnes de bétonnage.

Une discontinuité semblable existe dans le sens horizontal, puisque certains blocs sont en avance sur d'autres. Dans le cas particulier de la Grande Dixence, un problème nouveau a dû être résolu : celui de la transmission des efforts, de l'amont vers l'aval, à travers plusieurs joints parallèles au parement amont. Il a été résolu en créant de gros redans dont les faces sont parallèles aux directions principales des contraintes (figure 5).

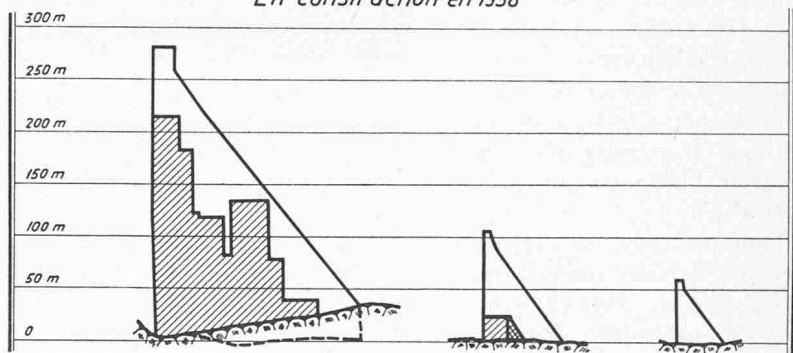
Un autre phénomène, très particulier aux grandes masses de béton, est celui de la *ressuée*, ou ascension capillaire d'une partie de l'eau contenue dans le béton frais. Elle apparaît à la fin de la vibration et se termine une ou deux heures plus tard, au moment où commence la prise du ciment. Mais si l'on recouvre une couche de béton frais par la suivante, et ainsi de suite, la ressuée devient cumulative et les flaques d'eau qui apparaissent à la surface sont beaucoup plus importan-



Nom	Mauvoisin	Moiry	Malvaglia	Luzzone	Nalps
Début du bétonnage	1954	1956	1957	1960	1959
Volume de béton en Miam	2.10	0.80	0.15	1.25	0.60
Contrôle du béton sur cylindres		■ ●	■ ●	■ ●	■ ●

Barrages - poids

En construction en 1958



Nom	Grande Dixence	Albigna	Bärenburg
Début du bétonnage	1953	1957	1959
Volume de béton en Miam	5.80	0.95	0.05
Contrôle du béton sur cylindres	■ ●		

Fig. 3. — Barrages suisses achevés en 1957 et en construction en 1958.

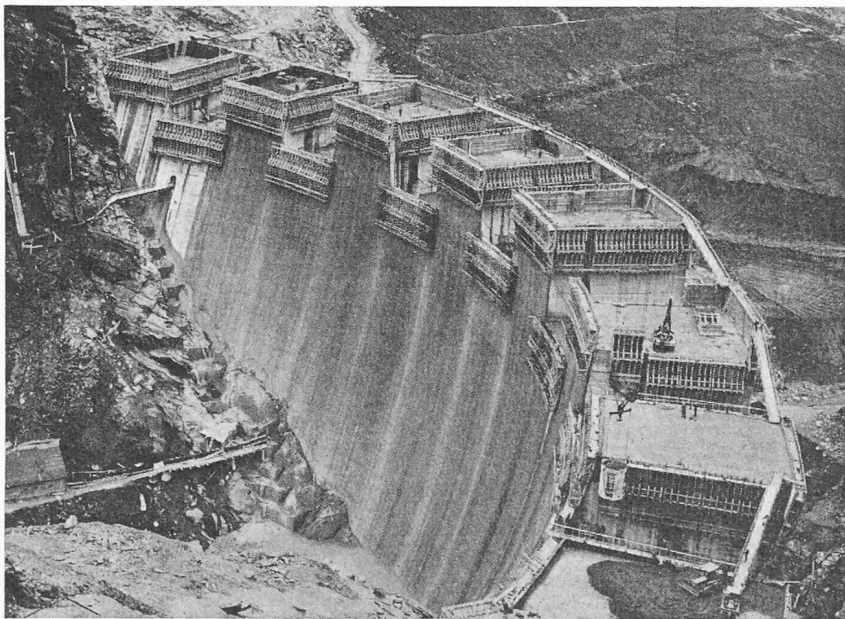


Fig. 4. — Barrage de Moiry.

Construction par blocs de 16 m de largeur. Hauteur des levées, 3 m. Répartition du béton par bulldozer en couches de 60 cm de hauteur. Vibration mécanisée (3 vibrateurs Notz, G.F. 125, de 7,5 CV chacun, montés sur bulldozer). (Projet et Direction générale des travaux : A. Stucky, Lausanne.)

tes à la fin du bétonnage qu'au début. C'est ce qui fait souvent dire aux visiteurs que le béton est « trop mouillé » (figure 6). Mais en réalité, si l'on voulait diminuer l'eau de gâchage, on ne pourrait alors plus vibrer le béton. D'ailleurs, l'intensité de la ressuée est influencée par certains facteurs, encore peu connus aujourd'hui, tels que la température, la dimension des bulles de l'air occlus, peut-être par la pression atmosphérique, etc. Le phénomène de la ressuée joue-t-il un rôle sur la qualité du béton, autrement dit, le béton est-il anisotrope ? Nous avons étudié cette question pour le barrage-voûte de Moiry, dont les contraintes principales sont tantôt verticales, tantôt obliques et voisines de l'horizontale. Les échantillons représentés sur la figure 7 ont été sciés dans de gros blocs. Ils sont dessinés dans la position qu'ils occupaient pendant la prise du ciment.

Par conséquent, l'ascension capillaire, qui a pu se produire dans des conditions normales, a eu lieu de bas en haut sur la figure, et les lignes horizontales représentent schématiquement la structure pseudo-feuilletée du béton qui en est la conséquence. A la compression, la résistance dite horizontale est en général plus faible que la verticale (0 à 10 %). A la flexion, les résultats sont souvent aberrants; la résistance horizontale est tantôt plus faible, tantôt plus élevée ($\pm 10\%$). Enfin, le module d'élasticité dynamique est en général plus élevé dans le sens horizontal (5 %). Ces différences s'expliquent aisément si l'on veut bien considérer la structure « feuilletée » du béton, mais elles ne sont pas si grandes que l'on pourrait l'imaginer au premier abord.

Pour terminer, je rappellerai une dernière cause d'hétérogénéité du béton : celle qui est provoquée par les variations de dosages (du ciment ou du sable, par exemple) voulues ou accidentelles. Ces dernières peuvent se produire lorsqu'on utilise de mauvaises malaxieuses. Je m'empresse de dire que les malaxieuses rencontrées sur nos chantiers de barrages sont très satisfaisantes. La figure 8 montre que la résistance d'une gâchée est très constante, quelle que soit la position du prélèvement. Pour un faible dosage, 160 kg CP/m³, par exemple, l'écart est d'environ $\pm 10\%$ par rapport à la moyenne, avec un maximum caractéristique au milieu de la vidange. Je laisse de côté, car d'autres conférenciers viennent d'en parler, la régularité proprement dite que l'on exige aujourd'hui du béton, celle de la granulométrie, celle des sables en particulier, l'humidité constante des matériaux, l'exactitude des pesées, etc.

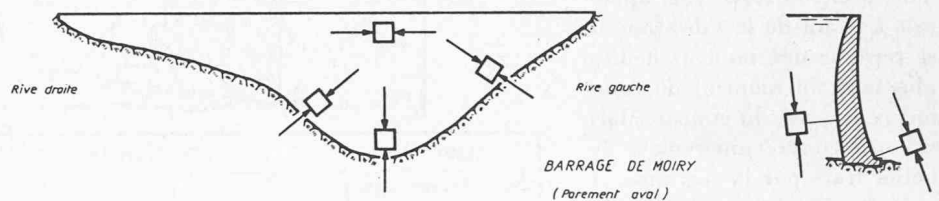
5. La résistance du béton de l'ouvrage

Je me propose de vous présenter ici une série de résultats obtenus aux barrages de la Grande Dixence, de Moiry et de Malvaglia, sur échantillons prélevés dans la masse par carottage vertical. Les « carottes », d'un



Fig. 5. — Barrage de la Grande Dixence.

Construction par blocs de 16 m de largeur, interrompus tous les 35 à 40 m par des joints longitudinaux munis de redans, solidarisés après un ou deux ans par des injections de ciment. (Projet et Direction des travaux : Grande Dixence S.A., Lausanne.)



<p><u>Résistance à la compression</u> (Prismes sciés de 30 x 30 x 45 cm)</p>	$C_h < C_v$ 0 à 10 %	
<p><u>Résistance à la flexion</u> (Prismes sciés de 20 x 20 x 60 cm)</p>	$F_h < F_v$ 10 %	
<p><u>Module d'élasticité dynamique</u> (Prismes sciés de 20 x 20 x 60 cm)</p>	$E_h > E_v$ 5 %	

Fig. 7. — Anisotropie du béton.

diamètre de 30 centimètres, sont débitées en cylindres de 45 centimètres de hauteur, qui sont donc comparables aux cylindres moulés au laboratoire du chantier, mais conservés en chambre chaude et humide. La figure 9 représente une coupe verticale à travers six levées de 3,20 m (Grande Dixence), chaque levée étant composée de cinq couches successives. Le forage, d'une longueur de 18 mètres, traverse quatre levées d'une

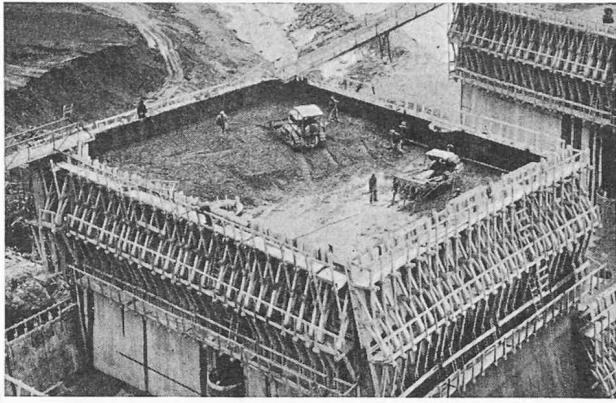


Fig. 6. — Ressuée du béton frais.

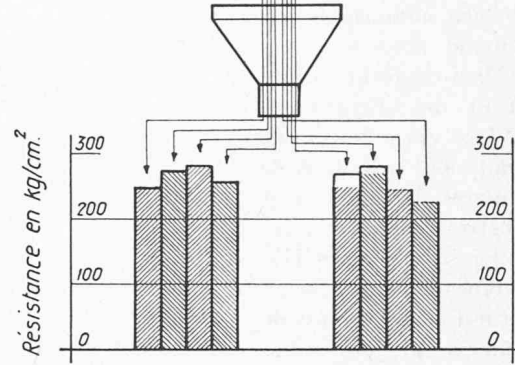
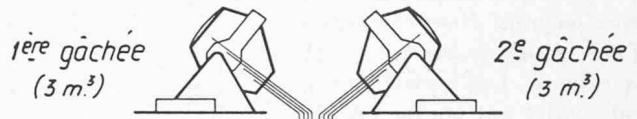
Barrage de Moiry. Répartition du béton au bulldozer. Vibration mécanisée (vibrateurs montés sur bulldozer). La vibration fait apparaître en surface une légère couche de mortier; ensuite commence la ressuée, ou ascension capillaire d'une partie de l'eau contenue dans le béton frais. Le béton non vibré (à gauche) est très sec. Le béton vibré (à droite) « paraît au contraire trop humide ».

campagne et deux levées de la campagne précédente. Au moment de l'essai, les carottes supérieures avaient été conservées un mois seulement dans la masse, celles du milieu deux mois, et celles de la campagne précédente un an. La résistance des carottes conservées dans la masse est plus grande que celle des cylindres moulés avec le même béton, mais conservés en laboratoire. L'importance de la durée de conservation dans la masse est surprenante : elle améliore la résistance de 5 à 15 % si elle a duré un mois, de 10 à 20 % pour deux mois, et jusqu'à 30 % pour un an.

Divers auteurs ont confirmé que la résistance du béton prélevé dans l'ouvrage est plus élevée que celle d'un échantillon conservé isolément. Mais si l'on y

Résistance sur cylindres 30x45 cm. à 90 jours
(3 cylindres par prélèvement)

Dosage 160 kg CP/m³ Granulométrie 0-120 mm



Résistance moyenne : 262 kg/cm² (+8%, -13%)

Dispersion des 24 résultats : e = 0,10

Fig. 8. — Homogénéité du malaxage.

regarde de plus près, cette règle souffre quelques exceptions (figure 10). Conservées pendant 90 jours dans la masse, les carottes ont une résistance plus élevée, mais seulement jusque vers 200 kg/cm². Au-delà, elle est plus faible. En revanche, à un an, la résistance des carottes semble toujours plus élevée.

Ce dernier fait, examiné en tenant compte du rôle joué par la dimension des éprouvettes, nous conduit à une conclusion importante : à un an et plus, la résistance véritable du béton de l'ouvrage est approximativement égale à celle des cylindres moulés et conservés isolément, tels qu'ils sont actuellement utilisés pour le contrôle du béton des grands chantiers. Je précise que cette conclusion n'est probablement valable que si les contraintes sont uniaxiales, comme c'est le cas dans les essais que j'ai relatés. Pour apprécier la qualité du béton, nous devons donc faire un pas de plus et parler de ses propriétés tri-dimensionnelles.

Dosage	Durée de conservation dans la masse		Résistance à la compression des carottes conservées dans la masse		R / R carottes / cyl. moulés en %	Résistance à la comp. des cylindres moulés conservés isolément en laboratoire.	
			0	100 200 300 400 kg/cm ²		0	100 200 300 400 kg/cm ²
140 kg CP/m ³	1 mois				105 à 115		
	2 mois				110 à 120		
150 kg CP/m ³	1 an				environ 130		

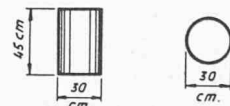


Fig. 9. — Influence de la durée de conservation dans l'ouvrage, sur la résistance à la compression.

6. La résistance du béton aux contraintes triaxiales

Je ne cacherai pas que le problème de la résistance du

béton aux contraintes triaxiales est compliqué et encore très peu connu. Je me bornerai donc à rappeler qu'un corps quelconque, et plus particulièrement qu'un corps en béton, soumis à une compression dans deux ou trois directions au lieu d'une, résiste beaucoup mieux à la rupture. Les essais dont je vais parler ont été réalisés par le *Bureau of Reclamation* et sont fort bien commentés par M. Chambaud dans les « *Annales de l'Institut technique du bâtiment et des travaux publics* »¹. Les éprouvettes de béton sont des cylindres de 15 centimètres de diamètre et 30 centimètres de hauteur, dosés à 250 kg CP/m³ (figure 11). Leur résistance uni-axiale, selon la conception classique, est de 250 kg/cm² à 28 jours. Les contraintes latérales, $n_1 = n_2$, sont obtenues par un fluide sous pression. La contrainte axiale n_3 est obtenue, comme d'habitude, par la poussée de deux têtes articulées en acier. Dans chaque expérience, la pression circonférentielle et la pression axiale sont augmentées progressivement, mais la première est maintenue fixe à partir du moment où elle atteint une certaine valeur choisie à l'avance, tandis que la seconde continue à croître jusqu'à la rupture. On voit que la résistance uni-axiale, dans le sens habituel du terme, augmente très rapidement si on lui adjoint une contrainte latérale, et qu'elle atteint par exemple 1000 kg/cm² avec une contrainte latérale de 100 kg/cm² seulement².

La connaissance de la contrainte axiale n_3 en fonction de la contrainte latérale ($n_1 = n_2$) permet de tracer les cercles de Mohr successifs correspondant à la rupture, et d'en

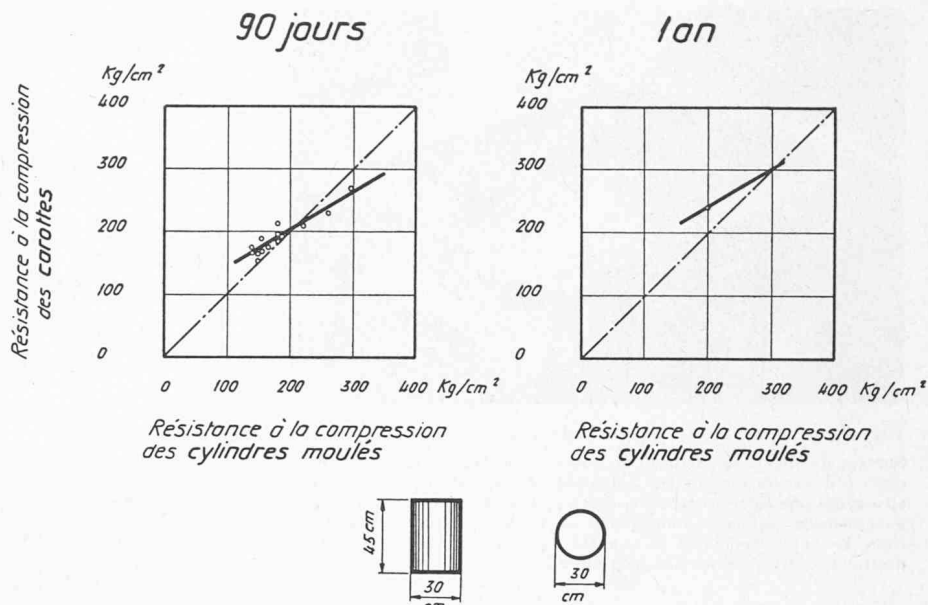


Fig. 10. — Relation entre la résistance du béton de l'ouvrage et celle du béton conservé en laboratoire. Influence de la durée de conservation dans l'ouvrage.

Essais du Bureau of Reclamation

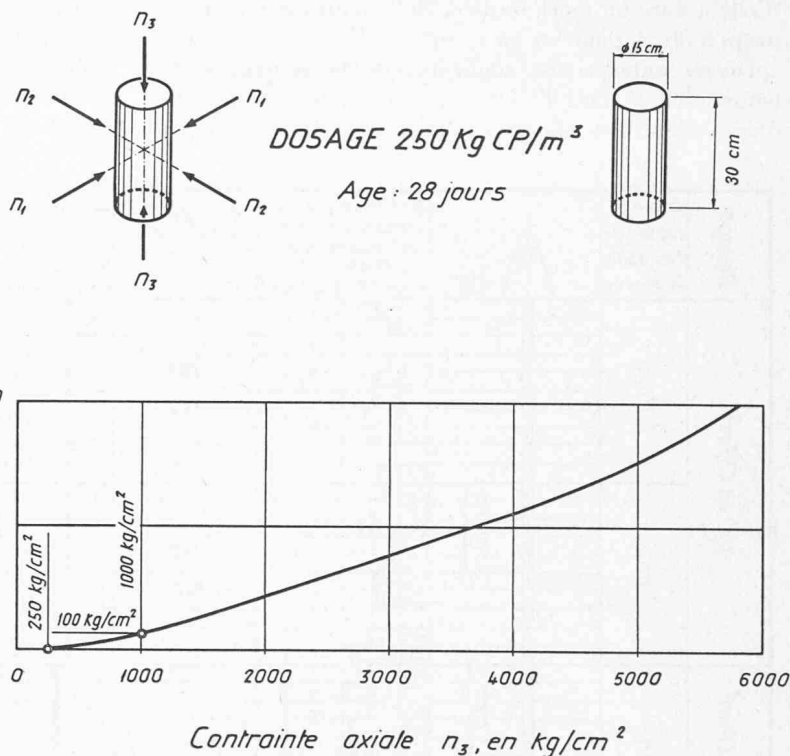


Fig. 11. — Résistance du béton aux contraintes triaxiales.

¹ Février 1951.

² On notera que, dans les essais américains, les contraintes latérales n_1 et n_2 sont égales. Au cours de la discussion qui a suivi les conférences, M. Fumagalli, ingénieur de l'ISMES, à Bergame, a cité des essais réalisés par cet institut, en appliquant toutes les forces (sur un cube de béton) au moyen de plateaux articulés, ce qui permet de rendre les contraintes latérales indépendantes l'une de l'autre. On constate alors que la théorie de Mohr (qui admet que la valeur du rapport des contraintes n_1/n_2 ne joue pas de rôle) n'est pas vérifiée pour le béton. Au contraire, si l'une des contraintes latérales est nulle (état bi-dimensionnel), la résistance axiale est moindre que si les deux contraintes latérales ont la même valeur.

déterminer l'enveloppe, ou courbe intrinsèque. On peut ainsi trouver une enveloppe pour les résistances à 28 jours, une autre à 90 jours, etc. Dans l'exemple de la figure 12, une contrainte uni-axiale de 100 kg/cm², pour rester dans le domaine des réalités, serait couverte deux fois et demie (autrement dit, pour ce béton, le coefficient de sécurité serait 2,5) puisque le

cercle de Mohr passant par $n_1 = 0$ et $n_3 = 250 \text{ kg/cm}^2$ deviendrait tangent à l'enveloppe. Si l'on adjoint à cette contrainte uni-axiale de 100 kg/cm^2 une petite compression latérale de 10 kg/cm^2 seulement, le cercle de Mohr s'éloigne de l'enveloppe et le coefficient de sécurité saute de 2,5 à 10, puisque le cercle de Mohr tangent à l'enveloppe passe maintenant par $n_3 = 1000 \text{ kg/cm}^2$ (au lieu de 250 kg/cm^2), et par $n_1 = n_2 = 100 \text{ kg/cm}^2$.

Une telle situation se présente fréquemment dans les barrages, mais jusqu'à présent, la prudence a incité les constructeurs à renoncer à cette possibilité. On voit donc qu'en réalité, la sécurité est beaucoup plus grande qu'on ne le croit.

Mais voici le revers de la médaille : certaines régions du parement aval des barrages-voûtes sont soumises simultanément à une traction et à une compression dans l'autre direction principale. On sait qu'un tel état de contrainte, où il existe une traction dans une des directions principales, est beaucoup plus défavorable que celui où le point considéré est comprimé de toutes parts. En effet, le cercle de Mohr, au lieu de s'éloigner de l'enveloppe, s'en rapproche et peut même la couper (figure 13). Comme cet effet joue dans le sens contraire de la sécurité, il faut donc en tenir compte en « pénalisant » les régions tendues. Cela revient à imposer au béton une qualité supérieure à celle nécessaire selon les conceptions classiques, qui ne considèrent que la seule contrainte principale de compression.

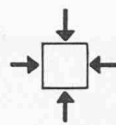
Un tel problème s'est posé pour les barrages de Mauvoisin et de Moiry, où l'on trouve des contraintes de traction de 10 à 15 kg/cm^2 . Nous avons donc mis au point une méthode dont la conclusion, valable pour la qualité particulière (et pratiquement identique) du béton de ces deux chantiers, est la suivante. Pour chaque point considéré, on calcule une contrainte fictive $\sigma^* = \sigma_c + 1,4 \sigma_t$ ¹. Autrement dit, la contrainte de compression σ_c doit être pénalisée de 1,4 fois la contrainte de traction σ_t qui se présente simultanément (c'est-à-dire pour le même cas de charge) dans l'autre direction principale.

7. Détermination des résistances exigées

Il s'agit maintenant de choisir les résistances à exiger du béton de chantier. Le point de départ est donné par les contraintes réelles (calculées et contrôlées par des essais sur modèle), ou par des contraintes « pénalisées », comme on vient de le voir. On détermine ensuite l'enveloppe des contraintes pour chaque zone de l'ouvrage (figure 14). En multipliant ces différentes contraintes par un coefficient de sécurité, on fixe les résistances qu'il faut exiger du béton, et par conséquent son dosage en ciment.

Quant au choix du coefficient de sécurité, je rappelle que, sur la plupart des chantiers suisses actuels de barrages, on le fait dépendre de la dispersion des essais de contrôle. En effet, il paraît logique que le coefficient de sécurité tienne compte, non seulement de la résistance moyenne du béton, mais aussi du risque d'obtenir une fois ou l'autre un très mauvais résultat. Ce risque augmente avec la dispersion des résistances isolées. Cette nouvelle méthode, mise au point par M. A. Stucky pour le barrage de Mauvoisin puis pour celui de la

¹ Dans cette formule, σ^* , σ_c et σ_t sont exprimés en valeur absolue.



Compression et compression (Amélioration)

Contrainte uni-axiale Contraintes tri-axiales

$$\sigma_1 = \sigma_2 = 0 \quad \sigma_3 = 100 \text{ kg/cm}^2 \quad \sigma_1 = \sigma_2 = 10 \text{ kg/cm}^2 \quad \sigma_3 = 100 \text{ kg/cm}^2$$

$$n_1 = 0 \\ n_3 = 2,5 \times 100 = 250 \text{ kg/cm}^2$$

$$n_1 = 10 \times 10 = 100 \text{ kg/cm}^2 \\ n_3 = 10 \times 100 = 1000 \text{ kg/cm}^2$$

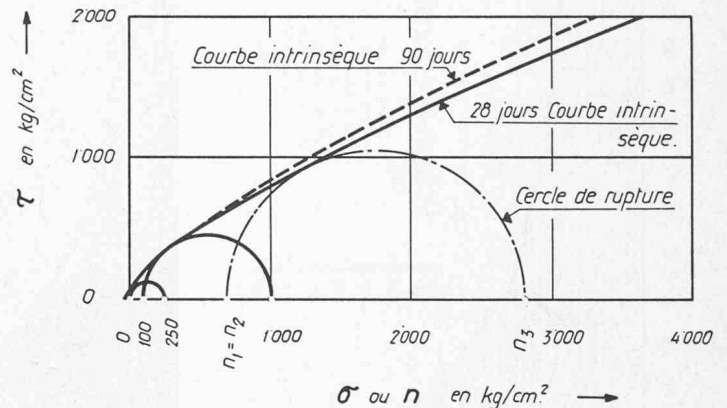
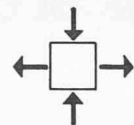


Fig. 12. — Résistance du béton aux contraintes triaxiales. Cas d'une compression dans toutes les directions.



Compression et traction (Agravation)

$$\sigma^* = \sigma_c + 1,4 \times \sigma_t$$

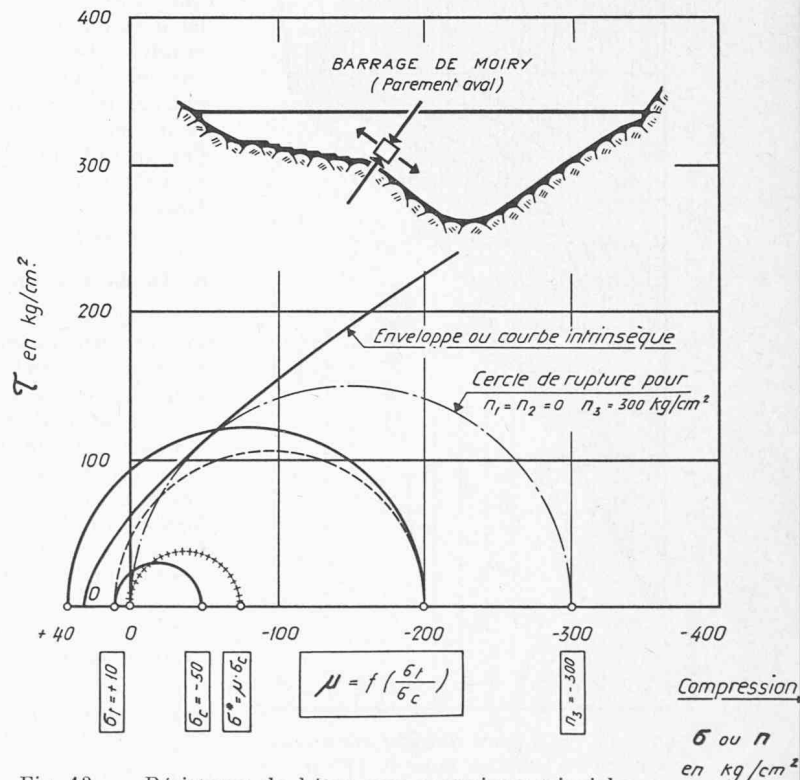


Fig. 13. — Résistance du béton aux contraintes triaxiales. Compression et traction.

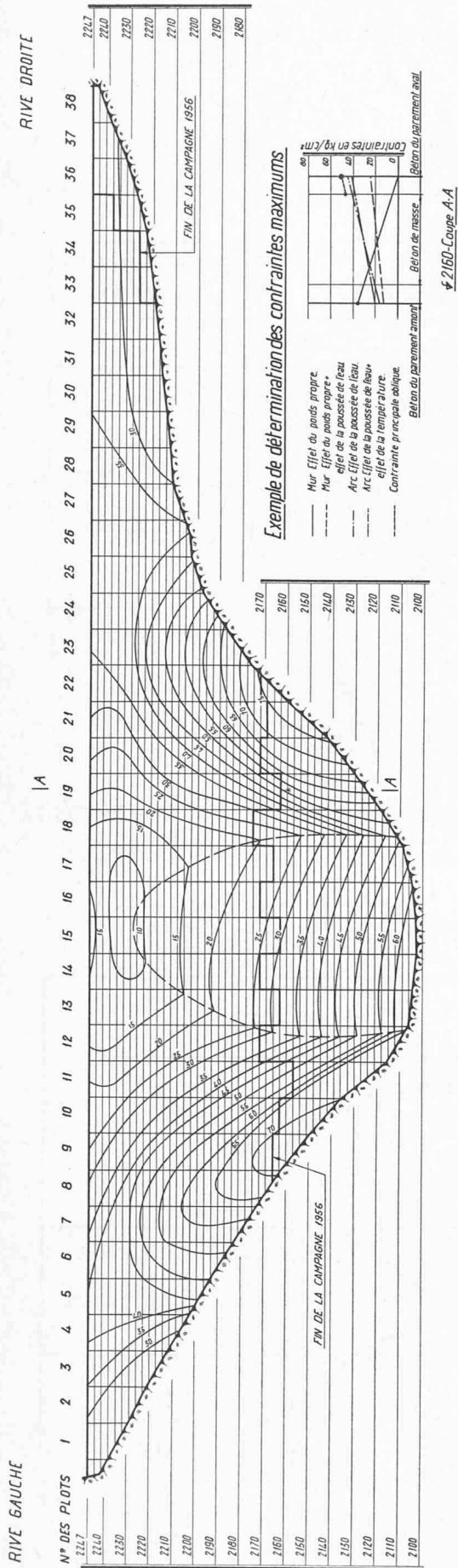


Fig. 14. — Lignes d'égaux contraintes maximums admises pour le calcul des résistances exigées. Barrage de Moiry. Parement aval.

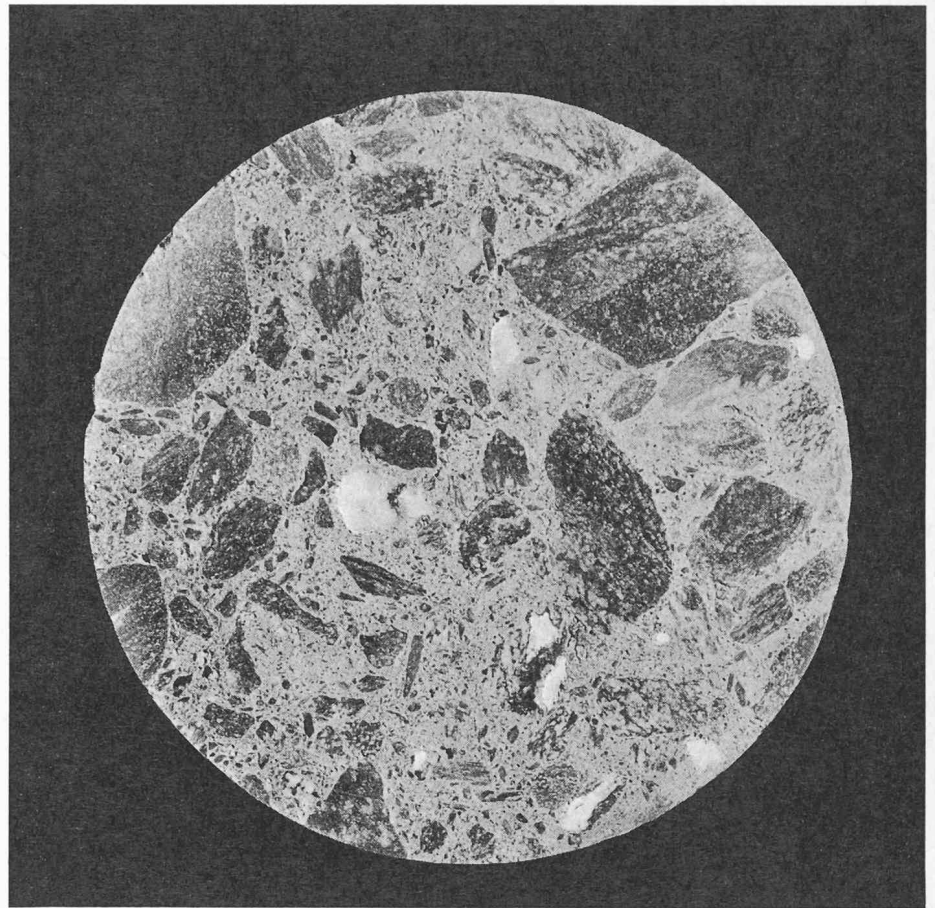


Fig. 15. — Béton de barrage dosé à 120 kg CP/m³ extrait de la masse par forage. Dosage et malaxage automatiques, transport par bennes de 6 m³, mise en place au bulldozer et vibration mécanisée. Carotte de 30 cm de diamètre.

Grande Dixence, a déjà été publiée dans diverses revues techniques¹, ce qui me dispense d'en parler plus longtemps. Par contre, je voudrais souligner ici que tous les entrepreneurs de barrages suisses ont compris l'importance de ce problème et s'efforcent d'obtenir, par des installations de plus en plus perfectionnées, la régularité de leur fonctionnement, condition essentielle d'une plus grande sécurité.

8. Tendances actuelles

En guise de conclusion, je rappellerai brièvement quelles sont les tendances actuelles en matière de technologie des bétons.

— Tout d'abord, *contrôle systématique des chantiers* par des prélèvements d'échantillons à l'échelle des grands ouvrages. Choix d'une forme qui donne une image aussi fidèle que possible de la résistance véritable du béton.

— *Fabrication mécanique et automatique du béton*, avec systèmes de verrouillage qui permettent d'éviter

les défaillances humaines. Régularité dans la préparation des matériaux, régularité dans la fabrication et la mise en place du béton.

— *Recherche de la maniabilité du béton* et mise en place systématique par vibration mécanisée.

— Ces différentes conditions permettront sans doute de généraliser, dans un proche avenir, l'emploi des faibles dosages, recherchés, d'une part, par souci d'économie et, d'autre part, pour diminuer la chaleur d'hydratation. Un dosage de 160 kg CP/m³ est aujourd'hui courant sur les barrages. A la Grande Dixence, grâce à la régularité de la fabrication du béton, on arrive depuis deux ans à couvrir des contraintes de 45 kg/cm² avec un dosage de 140 kg CP/m³ seulement, sans sacrifier, bien entendu, la sécurité. L'échantillon représenté à la figure 15, extrait par forage d'un de nos barrages suisses en automne dernier, et dont la compacité est irréprochable, montre ce que l'on peut obtenir aujourd'hui sur un chantier bien équipé et bien dirigé : ce béton est dosé à 120 kg CP/m³ et couvre une contrainte de 40 kg/cm².

¹ J.-P. STUCKY : *Technologie et contrôle des barrages en béton*. Bulletin technique de la Suisse romande, n° 19 du 15 septembre 1956. J.-P. STUCKY : *Über den Bau der Talsperren in der Schweiz*. Zement-Kalk-Gips, n° 11, novembre 1957 et 12, décembre 1957. Die Bauwirtschaft, n° 3 et 4 de janvier 1958.

Adresse de l'auteur : J.-P. Stucky, chemin de Roseneck 6, Lausanne.