

MÉCANIQUE DE LA DÉTÉRIORATION DE LA STRUCTURE NORMALE DU BÉTON

FERDINAND CAMPUS

Université de Liège, Belgique



Par suite de la nature de son objet, ce rapport répond à son titre en ce sens qu'il est très général. Les quatorze rapports particuliers en traitent des aspects spéciaux presque tous différents, à part d'eux d'entre eux relatifs à la résistance des bétons aux actions de la mer. Ils constituent des contributions originales à la question, mais ils ne couvrent pas l'ensemble du sujet, dont les aspects sont si nombreux qu'ils peuvent faire l'objet de gros volumes, et dont la variété est telle qu'elle requiert, pour leur étude détaillée, toutes les ressources des sciences fondamentales de l'ingénieur. Le rapport de *M. E. Janczewski* établit même la nécessité d'y ajouter, dans certains cas, le recours aux sciences biologiques, peu familières à l'ingénieur.

Cependant, par suite des phénomènes de variation qui se produisent dans les bétons, sous l'effet de l'écoulement du temps, lié aux changements de caractères du milieu extérieur qui réagissent sur le milieu intérieur, on a cédé à la tentation d'y

trouver quelque analogie avec les manifestations de la vie. L'âge des bétons est à tout le moins une notion commune et très importante. Les actions de l'eau, de la température et des autres facteurs du milieu ambiant, toutes conditionnées par l'énergie solaire, et celle du temps, peuvent être considérées comme présentant des analogies avec certaines actions biologiques élémentaires, dans un sens très passif. Mais les rencontres de Al, Ca, H, O et Si n'ont pas connu le sort extraordinaire de celles de Ca, H, O et C, bien que C et Si aient des caractères communs.

Le sujet de ce rapport général incite aussi à quelque rapprochement biologique parce qu'il est parfois désigné sous le nom de *pathologie du béton*. En fait, l'approche de la question par l'ingénieur peut être comparée aux démarches du médecin. Elle n'a pas le caractère principalement rationnel qui régit l'activité de l'ingénieur dans la conception et dans l'édification de ses constructions. Et même dans les essais et les recherches les plus habituels concernant les matériaux, qui, bien qu'expérimentaux, relèvent par la mécanique des sciences rationnelles.

Dans la détérioration des bétons, des effets et des influences nombreux, divers et diversement enchevêtrés interviennent, qui ne permettent pas aisément le recours aux mathématiques, même dans des problèmes nettement circonscrits et d'apparence relativement simple, tels celui de la gélivité (cf. rapport de *M. B. Warris*). Aucun cas de détérioration de béton n'est effectivement simple et exprimable exactement mais sommairement comme une résistance, une dilatation ou toute autre grandeur mécanique ou physique.

Le recours à l'expérience s'impose donc, mais n'est pas pour autant concluant. Il n'est en effet pas toujours possible de reproduire les dégradations observées sur les constructions. Les expériences et les essais ne donnent donc pas toujours des indications exactes et complètes. On a naturellement tendance, dans les recherches, à séparer les actions des diverses causes présumées, selon la méthode analytique usuelle, mais son application peut être décevante en l'occurrence. Les effets des diverses causes ne se superposent pas toujours d'une manière simple, mais peuvent s'influencer mutuellement d'une manière qui aggrave les actions combinées.

La durée intervient généralement dans les détériorations, qui sont donc progressives, mais parfois assez lentes, bien qu'inexorables. Les essais de longue durée sont, à tout prendre, les plus certains. Ils sont fastidieux. Ils sont aussi coûteux. Les essais de détérioration accélérée sont assez en faveur, mais leurs résultats ne sont à vrai dire le plus souvent que des indices, dont l'interprétation peut être incertaine; elle doit donc être orientée dans le sens de la sécurité.

C'est naturellement une sujétion grave des constructions en béton, surtout en béton armé et en béton précontraint, que d'être exposées à des dégradations qui peuvent les ruiner plus sûrement et plus rapidement que les actions mécaniques en vue desquelles les ingénieurs les calculent. Le rapporteur général se souvient de l'époque (avant la première guerre mondiale) à laquelle l'opinion générale était que la durabilité du béton était illimitée (cf. rapport *Jessing* et collaborateurs). Mais à cette époque, en raison même des difficultés de la confection manuelle du béton, la recherche des hautes résistances et la réduction correspondante des dimensions n'était pas encore vraiment le but principal du développement (cf. rapport précité) non plus que celle des hautes résistances initiales et du durcissement rapide du ciment. Les constructeurs prenaient de nombreuses précautions et la confiance dans la durabilité du béton était plus justifiée, parce que plus consciente et plus voulue qu'il y paraît actuellement (cf. rapport précité). Le rapporteur général se souvient des réserves formulées il y a un quart de siècle, lorsque la tendance à l'augmentation des résistances initiales des ciments et à l'accélération du durcissement a triomphé

et a été officialisée dans les normes. Ces réserves émanaient de personnes qui étaient encore imprégnées des précautions qui étaient de rigueur lors des débuts du grand développement du béton armé. Ces réserves n'étaient pas sans fondements. Le rapporteur général souscrit à l'opinion exprimée par le rapport *Jessing-Kjaer-Larsen-Trudsoe* que la durabilité du béton est à regarder comme une caractéristique aussi importante que sa résistance. Il y a, depuis le deuxième quart du siècle, une tendance toujours plus forte à exiger du béton des performances de plus en plus élevées. En outre, le développement du béton armé et du béton précontraint a donné naissance à une séparation de plus en plus accusée entre les auteurs de projets, qui ne sont souvent que des calculateurs, et les édificateurs, qui ne font plus qu'exécuter des ouvrages qu'ils n'ont pas conçus. La connaissance approfondie des matériaux ne reçoit plus toujours dans ces conditions sa due considération.

D'après sa propre expérience le rapporteur général est d'avis que les détériorations du béton sont devenues de plus en plus fréquentes par suite du développement même des techniques dont tous les éléments ont agi pour réduire la durabilité. Emploi de granulats de moindre qualité, éventuellement en raison de l'emploi de quantités de plus en plus importants. (Avant la première guerre mondiale, on importait en Belgique des graviers et des sables du Rhin allemand). Des gisements d'excellents granulats naturels ont éventuellement été épuisés ou sont en voie de l'être.

Emploi de ciments à haute résistance initiale et à durcissement rapide, à forte teneur en chaux et à mouture très fine, à dégagement de chaleur élevé et à grand retrait. Elévation constante des tensions admises dans le béton et dans les armatures, d'où la diminution de toutes les dimensions, des écartements et des recouvrements des barres. Eventuellement, augmentation de l'eau de malaxage (alors que les bétons d'avant la première guerre mondiale étaient confectionnés très secs et damés fortement à la main, mais sous surveillance constante). Enfin, multiplication de plus en plus rapide des constructions en béton armé et précontraint, dans laquelle le soin de l'exécution n'est plus toujours garanti en raison de la vitesse même d'exécution.

Les progrès techniques et scientifiques doivent cependant permettre d'obtenir actuellement des résultats qui ne soient pas inférieurs à ceux de jadis, mais cela exige de la part des auteurs de projet une connaissance aussi adéquate des matériaux que des calculs et plus de précautions relatives que lors des débuts du béton armé. Il est assez rare qu'une construction réalisée périsse par insuffisance du calcul. Le rapporteur n'en a connu que peu de cas. Mais il a connu beaucoup de ruines ou de menaces graves de ruine par détérioration du béton.

Une connaissance adéquate des matériaux modernes ne peut être obtenue que par l'expérience personnelle et par l'expérience scientifique, c'est-à-dire les expériences de recherche, d'agrégation, de contrôle et de réception. Que ces expériences soient de longue durée ou accélérées, on s'efforce toujours d'en représenter les résultats par des grandeurs caractéristiques mesurables : poids, résistances, déformations, module élastique, etc. . . . Mais cela aussi demande une attention très critique. Les résultats chiffrés autant que les apparences peuvent conduire à des appréciations inexactes ou incomplètes (cf. rapport *Campus*).

Il y a donc lieu pour les ingénieurs d'apporter à l'examen de ces questions l'esprit de finesse, de pénétration et de circonspection que doit être celui du médecin, mais que la formation peut-être trop formelle de l'ingénieur ne lui confère pas naturellement. Le bon sens reste de rigueur.

La structure normale du béton n'est pas une notion simple à définir, car la gamme des bétons est très étendue. Entre les bétons légers ou caverneux et les bétons très

compacts et lourds, tels par exemple que les bétons de routes et les bétons protégés contre les radiations nucléaires; il y a des différences de structures notables. On se réfère pour la définition de la structure normale à un béton courant, du type représenté en coupe à la figure 6 du rapport *Jessing* et coll. et ayant, par exemple, une composition telle que celle indiquée dans le rapport de *M. E. Janczewski*.

Gravier	780 litres (vol. app.)
Sable de rivière	420 litres (vol. app.)
Ciment portland	350 kg
Eau	170 kg

On peut admettre que cette composition correspond aux proportions en volumes absolus et aux poids suivants:

Gravier	0,429	1137 kg
Sable	0,252	668 kg
Ciment	0,111	350 kg
Eau	0,170	170 kg
	0,962	2325 kg

Si l'on admet que le volume total est d'un mètre cube, le béton frais comporte 0,038 de vides (air et vapeur d'eau). La répartition granulométrique doit être convenable, notamment celle du sable: pas trop de sable fin ni de sable trop fin (plus fin que 0,1 mm).

S'il n'y a pas de réactions entre les granulats et la pâte de ciment au cours de la prise et du durcissement, si notamment le gravier et le sable n'absorbent pas d'eau, seules des modifications des volumes absolus de ciment, d'eau et de vides se produisent au cours du temps. Une partie du ciment s'hydrate en fixant de l'eau; le volume total de ciment et d'eau correspondant subit une contraction. Selon que la conservation du béton est faite sous eau ou dans l'air plus ou moins sec, le volume d'eau peut augmenter ou diminuer, le volume d'air plus ou moins humide diminuer ou augmenter. Ces états sont compris entre deux limites: la saturation complète en eau liquide et la dessiccation complète, c'est-à-dire le départ total de l'eau évaporable. Il est inutile d'entrer ici dans les détails à ce sujet; ils sont assez connus. Les états limites et intermédiaires diffèrent d'ailleurs aussi par le retrait hygrométrique, qui modifie plus ou moins les volumes selon le degré d'humidité de la cure. Pour compléter cette définition, il faut encore se demander si le béton considéré doit être sans défauts ou peut comporter une proportion normale de défauts, c'est-à-dire d'hétérogénéités dues aux imperfections de la mise en œuvre. A coup sûr, il faut écarter des défauts graves par leur importance ou leur quantité. Les défauts, quels qu'ils soient (ségrégations, nids de graviers, vides, joints de reprise, etc. . .) aggravent l'hétérogénéité et l'anisotropie naturelles du béton et finalement, ont tous pour effet une diminution plus ou moins localisée de la compacité et un accroissement des vides en proportion et en dimension.

La mécanique de la détérioration de la structure normale du béton est une conception extrêmement générale. Les observations révèlent en effet des mécanismes divers de dégradation des bétons, constituant sinon des cas particuliers, du moins des catégories particulières. Restant dans le domaine macroscopique, où se situe le problème, on peut déceler cependant des facteurs communs intervenant dans ces mécanismes et qui sont l'hétérogénéité des bétons et principalement le retrait

thermo-hygro-métrique dû au ciment et à l'eau, en rapport avec les vides correspondants. La faible résistance à l'extension et au cisaillement est aussi un facteur commun et important des mécanismes de détérioration des bétons, mais il est déjà une conséquence des facteurs précédents plus fondamentaux. Conséquence directe de l'hétérogénéité qui, d'une manière générale, est défavorable à la résistance mécanique, notamment par les vides, qui provoquent des concentrations de tension. Conséquence indirecte par les tensions intrinsèques de retrait, qui affectent d'une manière grave le seul élément de liaison du béton, qui est la pâte de ciment.

Le rapport de *M. Snowdon* confirme l'importance de ces tensions intrinsèques, dont le rapporteur général signalait déjà le caractère nocif dans une communication du 21 décembre 1933 à l'Association belge pour l'essai des matériaux et dont il établissait l'ordre de grandeur dans une communication au 4^e Congrès international de mécanique appliquée à Cambridge en 1934 (cfr. Abstracts of Papers, University Press, Cambridge 1934. Voir également Annales des Travaux Publics de Belgique, février 1935, *Hormigon y Acero*, n° 16, 18, 19 et 20, 1935, *Revue Universelle des Mines*, janvier et février 1936). Il envisageait le cas normal de granulats inertes, c'est-à-dire ne subissant pas de changements de volume, la pâte de ciment étant seule rétractile. Il est bien connu qu'il y a dans ce cas une différence appréciable d'ordre de grandeur entre le retrait de la pâte pure, du mortier et du béton; toutes autres choses étant égales (cfr. rapport *M. Kondo*). Il en résulte que dans le béton la pâte de ciment, c'est-à-dire l'élément liant, est soumise à de fortes tractions, qui se développent et croissent à mesure du durcissement. Les grains de sable et de gravier sont comprimés.

Si la dessiccation d'un béton très mouillé est rapide, elles peuvent en résulter des fissurations par retrait du mortier, comme le montre la figure 1, empruntée à *J. Bolomey*

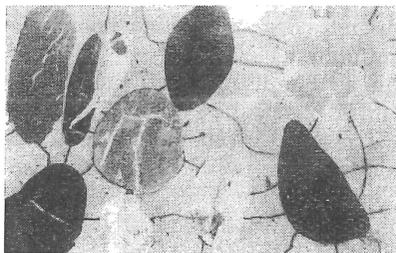


Fig. 1. Fissuration du mortier par retrait.

(Gélimité des bétons, Bulletin du Ciment, n° 11, novembre 1946, Wildegg, Suisse). Ce phénomène est confirmé par des recherches en cours dans les Laboratoires du Department of Structural Engineering de l'Université Cornell à Ithaca (N.Y.), effectuées sous la direction des Professeurs *G. Winter* et *F. Slate*, qui ont autorisé le rapporteur général à en faire mention à la suite d'une visite récente à leurs laboratoires. Les fissures sont mises en évidence par transparence de lames minces aux rayons X. Des modèles plans sont expérimentés en disposant des anneaux d'acier rigides d'égal diamètre dans un mortier très rétractile suivant diverses dispositions géométriques alignées. Si chaque anneau en touche quatre autres (rangement carré), les forces de compression sont reprises par le contact des anneaux et les fissures se produisent par

décollement entre le mortier et les anneaux. Si les anneaux sont écartés et ne se touchent plus, leurs centres étant toujours situés aux sommets de carrés, les fissures se produisent dans le mortier entre les anneaux, comme à la figure 1. *MM. Winter et Slate* appellent ces fissures «microcracks» et les distinguent d'autres fissures microscopiques d'au moins deux espèces différentes selon eux, qui naissent sous l'action des charges extérieures. Ils estiment que la nature de ces fissurations microscopiques influence considérablement les propriétés mécaniques des bétons.

Le rapporteur général croit que ces fissures microscopiques, qui constituent un commencement de désagrégation interne, jouent aussi un rôle considérable dans la mécanique de la détérioration de la structure normale du béton. Cependant, il n'est pas certain que ce rôle soit unanimement admis, ni même l'existence des fissures microscopiques, qui paraît pourtant bien établie si des précautions convenables ne sont pas prises pour les éviter ou les réduire au minimum.

Mais il y a des défauts macroscopiques plus graves encore et qui peuvent jouer un rôle décisif dans certains mécanismes de détérioration, soit dans les bétons très mouillés, soit dans les bétons vibrés. Dans les deux cas, le tassement se fait par une sorte de sédimentation avec remontée relative d'eau et d'air par rapport aux granulats (le dégagement de l'air est bien visible pendant l'opération de vibration). Il arrive alors que des petites poches d'air, qui se remplissent ensuite plus ou moins d'eau, soient arrêtées dans leur remontée sous la face inférieure des gros granulats, surtout les plus plats disposés horizontalement. Il en résulte de véritables décollements entre les granulats et la pâte liante, qui ont une tendance à être stratifiés. Ils sont, selon *J. Bolomey*, responsables de nombreuses détériorations par gélivité de bétons massifs, caractérisées par un feuilletage progressif à partir de la surface. Ces défauts ne sont pas des malfaçons au sens propre. Ils constituent plutôt une localisation de la phase gaz et vapeur sous forme de vides assez importants et défavorablement disposés. Il semble qu'il faille les considérer comme possibles dans une structure normale, encore qu'il y ait lieu de prendre des précautions pour les éviter autant que possible, du moins les réduire au minimum.

Ce qui précède établit que la définition de la structure ne réside pas dans la composition initiale du béton, mais bien dans l'état, à une époque déterminée, variable au cours du temps. Cette structure procède de la composition initiale du béton frais, mais est influencée par sa confection, sa mise en oeuvre, sa cure et toutes les actions internes et externes qui ont agi sur le béton jusqu'à l'époque considérée. Elle comporte des phases eau liquide et air humide qui sont labiles et qui occupent des solutions de continuité de la phase solide (ou semi-solide), qui constituent des vides, dont certains peuvent être des fissures. Cette structure est considérée comme normale si elle ne présente pas des défauts caractérisés ou excessifs, selon la bonne pratique professionnelle.

Une question se pose alors, suggérée par divers rapports particuliers. Un béton peut-il être considéré comme possédant une structure normale :

1. En cas d'emploi de granulats réagissant avec le ciment (rapport *Jessing-Kjaer-Larsen-Trudsoe*).
2. En cas d'emploi de granulats rétractiles ou expansifs (rapport *Snowdon*).
3. En cas d'emploi de granulats tendres et absorbants (rapports *Y. Koh - T. Hattori* et *T. Nishi - H. Nagashima*).

L'opinion du rapporteur général est qu'il faut mettre en doute la normalité, du moins en ce qui concerne sa durabilité, d'un béton formé de granulats constituant une cause active de détérioration dans les conditions de l'emploi.

Le rapport *Jessing-Kjaer-Larsen-Trudsoe* indique d'une manière développée les effets de la réaction alcali-silice entre les sels alcalins du ciment et la silice des granulats, en l'occurrence certains silex à silice hydratée ou opale. Le rapporteur général n'a pas de connaissance personnelle de ce phénomène, fort bien décrit par les auteurs du rapport. Ses effets destructeurs produisent des fissurations et des écaillages volumineux qui résultent de la formation d'un gel expansif entre les granulats et la pâte de ciment. Le mécanisme de la détérioration par expansion ne paraît pas différer au point de vue mécanique d'un type de caractère assez général. Le problème se ramène à vrai dire à la définition des limites et des circonstances dans lesquelles des granulats présentant cette intolérance aux alcalis du ciment peuvent être utilisés sans risques graves de grandes dégradations. C'est à quoi pourvoient les Recommandations provisoires danoises résumées par les auteurs en fin de leur rapport.

La détérioration ne se développe pas sous l'effet de l'eau de malaxage, mais bien par l'absorption ultérieure d'eau. Pour les bétons destinés à être en service permanent dans une atmosphère sèche, il n'y a pas de problème; un béton normal peut être confectionné avec les granulats en question. En cas de possibilité de pénétration d'eau, des précautions spéciales sont à prendre, allant de l'emploi de ciments spéciaux à faible teneur en sels alcalins pour les cas anodins, à l'exclusion des granulats pour les cas d'immersion permanente dans des eaux riches elles mêmes en sels alcalins dissous.

Le rapport *Snowdon* traite du cas de granulats rétractiles, phénomène dont le rapporteur général n'a pas non plus de connaissance personnelle, mais dont il avait été informé en 1959 par *M. T. L. Webb*, du National Building Research Institute, à Pretoria (Union de l'Afrique du Sud). Il s'agissait dans ce cas de granulats sédimentaires (grès à grain fin pour les graviers, le même grès ou schiste pour les sables) des Séries de Beaufort du Système du Karroo. *M. N. Stutterheim*, dans la référence citée par *M. Snowdon*, indique d'ailleurs que les gisements de ces roches sont fortement dégradés par les intempéries. Dans le rapport de *M. Snowdon*, il s'agit de roches écosaisies, principalement des dolérites, de nature ignée.

Ces roches, présentent comme la pâte de ciment, un retrait en cas de dessiccation et un gonflement en cas d'humectation. Des graviers et des sables de cette nature sont susceptibles d'ajouter leur retrait à celui de la pâte de ciment ou inversement, selon les circonstances. La dernière occurrence est naturellement la plus dangereuse pour le béton. Par exemple si des granulats secs sont liés par une pâte de ciment assez mouillée, les granulats absorbent de l'eau de la pâte et gonflent, cependant que la pâte est plus appauvrie en eau qu'avec des granulats ordinaires et subit un retrait élevé. Les tensions de retrait qui résultent des deux effets sont accrues par rapport aux conditions plus normales définies plus haut; une fissuration importante est inévitable.

Si l'on considère (figure 2, cf. Hormigon y Acero, n° 19 et 1935 et Revue Universelle des Mines, février 1936), un grain sphérique de rayon a non rétractile entouré d'une enveloppe sphérique concentrique de rayon extérieur b et subissant un retrait spécifique Δ_b , il se produit au contact des tensions normales de traction (maxima) égales à

$$\sigma_t = \sigma_c = - \frac{\frac{1}{2a^3} + \frac{1}{b^3}}{\frac{1}{a^3} - \frac{1}{b^3}} \frac{\Delta_b}{\frac{1 - 2\mu_a}{E_a} + \frac{2}{b^3} (1 - 2\mu_b) + \frac{1 + \mu_b}{a^3}} + \frac{2}{2 E_b \left(\frac{1}{a^3} - \frac{1}{b^3} \right)}$$

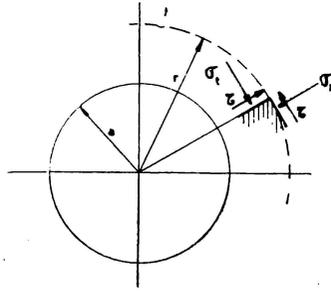


Fig. 2. Tensions au contact des grains.

dans l'hypothèse de l'élasticité. Si le grain sphérique central subit lui même un retrait Δ_a , il faut substituer dans la formule précédente $\Delta_b - \Delta_a$ à Δ_b . Si le grain subit une expansion, c'est-à-dire un retrait négatif $\Delta_a = -\varepsilon_a$, il faut, dans la formule, substituer $\Delta_b + \varepsilon_a$ à Δ_b . Le problème est donc régi par le retrait différentiel. Il peut être important en cas de retrait d'un des milieux et d'expansion de l'autre, la différence devenant alors une somme arithmétique. Dans la formule précédente, E et μ sont les modules de Young et les coefficients de Poisson respectivement de la sphère centrale (indice a) et de l'enveloppe (indice b). La figure 3 représente un disque cylindrique de pâte de ciment auquel a été appliqué une pression d'eau sur une face suivant une surface circulaire concentrique au disque. L'imbibition de la partie centrale a fait gonfler celle-ci au point que l'anneau extérieur sec s'est fendu suivant un diamètre, à travers la partie centrale mouillée (cf. références précitées). C'est une image suggestive des effets des retraits ou dilatations différentiels.

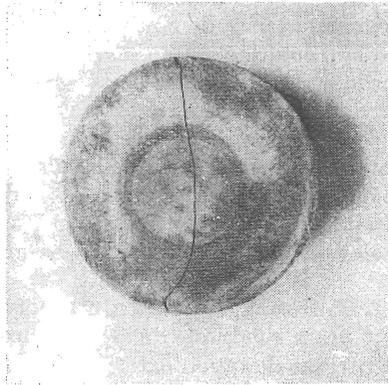


Fig. 3. Fissuration par dilatation différentielle.

Le rapport de *M. Snowdon* expose et discute les résultats des observations et des expériences, dont certaines anomalies ne sont qu'apparentes et montrent bien que le facteur prédominant est le retrait différentiel des divers éléments du béton. Un phénomène important, constaté aussi par *M. Stutterheim*, est l'expansion permanente et croissante d'un béton à granulats rétractiles soumis à un grand nombre

de cycles de saturation et de dessiccation alternées. Dans le cas de granulats à volume constant, il y a au contraire un léger retrait. Les phénomènes ne sont donc pas réversibles et la dilatation permanente des bétons à granulats expansifs est telle que l'effet des seules intempéries entraîne sa désagrégation. Selon la publication de *M. Stutterheim*, des dégradations ont été observées tant à l'intérieur de bâtiments qu'à des ouvrages extérieurs, ce qui correspond aux remarques précédentes. Si selon lui les ouvrages affectés par ces détériorations ne doivent pas être mis hors service et pourront durer un certain temps, il n'en recommande pas moins de renoncer à utiliser des agrégats présentant cette propriété défavorable et au besoin, d'importer des matériaux sains. Le rapporteur général croit pouvoir conclure que les granulats rétractiles et expansifs ne conviennent pas pour un béton à structure normale, ni en béton massif, ni en béton armé (à cause du fort retrait et de l'invariabilité de volume des barres d'acier), ni en béton précontraint (à cause de la forte perte de précontrainte, cf. *Stutterheim*). Mais le rapport de *M. Snowdon* est très significatif. Par le tableau de l'amplification du phénomène du retrait différentiel, il contribue à mettre en évidence l'état de tension résiduel de retrait du béton normal, fait avec des matériaux normaux. Ce n'est pas une question de tout ou rien, c'est une question de degré.

Les rapports de *MM. T. Nishi* et *H. Nagashima* sur l'emploi au Japon de granulats de pierre ponce et de *M. Y. Koh* et *T. Hattori* sur l'emploi de granulats de roches tendres posent aussi des problèmes de degrés de normalité. On peut admettre à priori que pour des bétons dont on exige des qualités de durabilité dans certaines circonstances d'emploi, les granulats doivent eux-mêmes être durables dans ces conditions. Il en va de même pour la résistance, qui n'est pas sans rapports avec la durabilité. C'est une règle ancienne que les granulats doivent posséder une résistance mécanique au moins égale à celle du mortier qui les lie et à celle exigée du béton.

Les conclusions du rapport *Koh-Hattori* sont conformes à toute attente: exclusion des granulats de roches tendres dans les bétons durables et efficacité de l'essai d'écrasement des granulats pour déceler les roches tendres. Les deux rapports de *MM. Nishi* et *Nagashima* concernent des granulats de pierre ponce assez particuliers également. Les conclusions des rapporteurs sont assez conformes à ce qui précède et établissent aussi qu'il s'agit d'une question de degré. Les bétons de pierre ponce ne se comportent pas d'une manière essentiellement différente des autres en ce qui concerne leur durabilité ou leur susceptibilité à la détérioration ou même en ce qui concerne leurs autres propriétés. Leur comportement est en rapport avec les qualités de ces granulats et est d'autant plus normal, c'est-à-dire meilleur, que les granulats de ponce seront moins absorbants, plus résistants et que le béton est plus résistant. La qualité de ces granulats doit donc être adaptée aux conditions de l'ouvrage. Somme toute, il ne s'agit pas pour ces granulats de propriétés nocives, comme dans le cas des granulats réactifs et expansifs, qui constituent en eux-mêmes des agents de détérioration, mais de granulats sinon déficients, du moins plus ou moins médiocres et réduisant la résistance du béton, notamment aux effets des agents de détérioration. Ils peuvent être utilisés dans la mesure où ils répondent aux qualités attendues des bétons dans la composition desquels ils entrent. Ils ne posent donc pas de problème général en ce qui concerne la mécanique de leur détérioration.

Pour être complet, mais pour mémoire seulement, il sera fait allusion au cas où la détérioration pourrait provenir de la nature du ciment. On peut admettre que des précautions suffisantes sont prises d'une manière générale pour empêcher l'emploi de ciments gonflants ou qui sont susceptibles de transformations allotropiques de leurs constituants hydratés et qui peuvent ainsi produire par foisonnement, la destruction du béton.

La structure normale d'un béton étant plus ou moins prédisposée à la détérioration, mais en excluant les cas considérés d'auto-détérioration, il faut l'intervention d'agents extérieurs pour provoquer et entretenir un processus de détérioration plus ou moins rapide, mais caractérisé et progressif.

Les facteurs mécaniques ne sont guère considérés ici. Le rapporteur général est d'avis qu'ils ne concernent le sujet que dans la mesure où ces facteurs mécaniques sont susceptibles de provoquer la fissuration du béton et encore en rapport avec le degré d'agressivité de l'ambiance. Ce problème de la fissuration a fait l'objet d'un Colloque à Stockholm en 1957. Il en sera question plus loin. Il y a seulement lieu de faire remarquer que toute fissuration mécanique augmente en principe la prédisposition du béton à la détérioration.

L'effet physique à considérer est l'effet calorifique, c'est-à-dire les variations de température. La question des effets éventuellement destructifs des autres radiations, notamment nucléaires, n'est pas envisagée ici; ils ne paraissent d'ailleurs pas très intenses. On n'envisage pas non plus l'effet des hautes températures, c'est-à-dire la résistance du béton au feu, qui constitue un problème spécial. D'ailleurs pas tellement brûlant, puisqu'aussi bien on a recours à la protection des ossatures métalliques contre les effets des incendies par enrobage dans du béton.

Le béton a une conductibilité et une diffusivité calorifiques médiocres. Il en résulte que les effets des variations de température extérieure ne se propagent qu'assez lentement dans le béton et n'en affectent que les parties superficielles. Les effets directs, résultant des différences des coefficients de dilatation des constituants du béton, résultant de son hétérogénéité, ne retiennent généralement guère l'attention. Il n'est pas exclu qu'ils puissent intervenir au bout d'un temps assez long, par répétition de dilatations différentielles, dans une sorte de vieillissement superficiel du béton, d'ailleurs assez lent. Les effets importants sont plutôt indirects et agissent sur les phases labiles eau liquide et air humide. Des températures relativement élevées en permanence dessèchent le béton et augmentent le retrait. Cet effet est particulièrement à craindre pour du béton frais. Sous l'effet de températures extérieures élevées, des fissures peuvent se marquer pendant les premières heures de la prise et du durcissement à l'air sur des éléments fraîchement bétonnés, surtout en cas d'emploi de ciments très actifs. Le dégagement de la chaleur d'hydratation de ces ciments peut contribuer au phénomène. Les constructions aériennes ou du moins durcissant initialement à l'air sont exposées à ce phénomène. Il peut en résulter des fissurations par retrait et dilatations différentiels. Les cas d'apparition rapides de fissures visibles sont cependant exceptionnels. Le plus souvent, elles n'apparaissent qu'après un temps plus ou moins long en surface. Il peut y avoir éventuellement des fissures microscopiques internes.

L'immersion permanente sous eau est radicale. Elle supprime le retrait et elle limite aussi les variations thermiques. L'immersion temporaire pendant les premiers âges du béton est aussi efficace. Le retrait est réduit et s'exerce d'une manière différée, alors que le béton a déjà acquis une résistance à l'extension voisine de son maximum. Des immersions et des émergences alternées sont généralement plutôt favorables, sous réserve des effets du gel et de ceux des climats tropicaux à saisons sèches et saisons de pluies alternées. Il est compréhensible que l'on ait tenté par des essais de mettre en évidence une aptitude éventuelle de fissuration des ciments par retrait. L'essai de fissurabilité de l'anneau de pâte ou de mortier de ciment à noyau d'acier a certes un sens qualitatif, mais sa signification quantitative est douteuse. Certains résultats du rapport de *M. M. Kondo* semblent en effet contradictoires avec les constatations d'expérience générale indiquées ci-dessus et le fait bien établi aussi

que la cure sous eau augmente la résistance à l'extension du béton. Les conditions d'expérience semblent avoir un effet prédominant et ne correspondre guère à ce qui se passe à l'intérieur d'un béton. On sait que le retrait s'y développe de manière inégale d'ailleurs.

La gélivité du béton est certes un des cas les plus importants de détérioration du béton, même dans des pays à climat marin modérément tempéré, comme la Belgique. Elle est en grande partie responsable de la plupart des dégradations courantes si fréquemment observées sur les constructions aériennes en béton après une durée variable avec la qualité des bétons. Elle semble économiquement comparable à la corrosion des constructions métalliques. Des facteurs économiques peuvent d'ailleurs y jouer un certain rôle. Il en est ainsi pour les dégradations importantes rencontrées sur beaucoup de grands barrages. On y est souvent descendu dans le passé à des dosages trop pauvres en ciment, tant pour réduire le prix du béton que pour diminuer le dégagement de chaleur. Il est arrivé, dans le premier quart du siècle, que l'on ait eu recours au béton coulé en grandes masses. Ces bétons très poreux et contenant une grande quantité d'eau ont d'autant moins résisté au gel qu'ils contenaient probablement les défauts macroscopiques du type de ceux indiqués plus haut selon *J. Bolomey*. Ses travaux bien connus ont d'ailleurs eu comme origine le barrage de Barberine en Suisse et les dégradations par le gel qui y ont été constatées.

Dans des pays à climat rigoureux comme les Etats du Nord de l'Amérique, les routes en béton ont subi de graves dommages par le gel et on y rapporte l'invention des entraîneurs d'air. Le rapport *J. Mlodecki* constitue un exposé de la question des entraîneurs d'air très adéquat au sujet, car il met en évidence leur effet au point de vue de la structure. Il semble que l'emploi des entraîneurs d'air soit moins un moyen de contrôle de la quantité d'air que de la structure des vides d'air dans le béton sous forme de bulles de dimensions limitées (de l'ordre de 0,1 mm), empêchant ainsi la formation des poches d'air de dimensions beaucoup plus grandes et de forme beaucoup plus défavorable, auxquelles *J. Bolomey* attribue un rôle très néfaste dans la gélivité du béton.

Les deux rapports *J. Mlodecki* et *B. Warris* concordent pour fixer à 9 % au minimum le volume des vides d'air par rapport à celui de l'eau congelable. Mais, comme le constate *M. Warris*, c'est un minimum qui n'est pas toujours suffisant, même en cas d'emploi d'entraîneur d'air lorsque la congélation est très rapide. Les entraîneurs d'air agissent aussi indirectement en ce sens qu'ils permettent de modifier la structure par une légère diminution de la quantité de sable et de la quantité d'eau, à facilité égale de mise en œuvre. Celle-ci peut encore être améliorée éventuellement par l'addition de plastifiants. Ces légères modifications de la composition peuvent améliorer la structure du béton au point de vue de la gélivité par la réduction de la phase labile eau liquide, associée à une répartition et à une forme plus favorable de la phase air humide.

Les détériorations par le gel des constructions procèdent à partir de la surface et sont progressivement pénétrantes. Elles ruinent complètement les éléments minces et peuvent affecter gravement les massifs tels que les barrages et les écluses. L'incidence de ces dégradations doit être considérée dans l'économie.

Le Sous-Comité du béton spécial pour grands barrages du Comité international des grands barrages a étudié la question depuis 1948. Ses premiers travaux ont été présentés en 1955 au 5^e Congrès des grands barrages à Paris.

Il en ressort que la résistance au gel est vraiment une question de structure et qu'elle requiert dans tous les cas une étude très approfondie des matériaux dont on dispose, de la composition du béton et de la mise en œuvre. Les essais de gélivité sont

très longs et difficiles à interpréter en rapport avec les conditions de la réalité. Ainsi qu'il a été indiqué plus haut, ils procurent des indices, parfois discutables. Il en est ainsi a fortiori des essais par immersion et émergence alternées dans des solutions de sels tels que le sulfate de magnésium (cf. rapport *Y. Koh - T. Hattori*) ou de sodium (rapport *Lhopitallier, Rives et Stiglitz*).

Les facteurs chimiques et biologiques de détérioration peuvent être considérés ensemble, car les agents biologiques attaquent en réalité le béton par voie chimique (cf. rapport *E. Janczewski*). Les détériorations biologiques sont d'ailleurs moins fréquentes que celles d'origine chimique et leur ressemblent dans les cas où les dégradations chimiques sont liées à la structure du béton. Celles-ci sont seules considérées ci-après, en écartant celles provenant d'agents bien connus tels que les acides forts concentrés, les acides organiques et leurs dérivés, les huiles et les graisses végétales et animales, les sucres, la glycérine, les solutions concentrées de certains sels, etc. . . . Ces produits exercent une attaque chimique vive sur les ciments. Il faut donc éviter tout contact entre ces agents chimiques et les bétons par des revêtements divers absolument étanches: métaux non corrodables, revêtements de verre ou de céramiques vitrifiées, chapes ou enduits plastiques, etc. On se borne ici à examiner des cas d'attaques moins vives, dans lesquelles la structure est éventuellement susceptible de limiter sinon d'empêcher les dégâts, sans autres mesures.

Les agents chimiques responsables de la détérioration se présentent à l'état de liquide (solutions) ou de gaz (aussi de vapeur). Dans cet état, ils peuvent être en contact superficiel intime avec le béton et éventuellement pénétrer à l'intérieur en raison de sa structure discontinue. L'attaque peut procéder par pénétration, elle est alors superficielle et met en jeu l'étanchéité de la surface et le pouvoir absorbant du béton. Elle peut aussi se produire par percolation, c'est-à-dire par cheminement à travers toute la masse. Elle met en jeu la perméabilité interne du béton. L'attaque se manifeste aussi superficiellement, mais elle se produit à partir de la surface de sortie; elle progresse en sens inverse de la percolation (cf. rapport *Lhopitallier, Rives et Stiglitz*). L'attaque biologique par les champignons décrite et étudiée par *M. E. Janczewski* semble procéder de même à partir du moment où l'action des éléments chimiques secrétés par les champignons a permis à ceux-ci de traverser le béton à la faveur de sa structure discontinue. Des attaques biologiques superficielles du béton, analogues au premier type d'attaque chimique extérieure, peuvent provenir par exemple d'organismes en quête de sels calciques, tels que les mollusques marins, pour former leurs tests. Les caisses contenant les éprouvettes immergées dans la mer dont il est question au rapport *Campus* sont encombrées de coquillages, dont beaucoup sont fixés fermement aux éprouvettes. Mais il n'en résulte pas de dégâts appréciables.

La structure du béton joue dans la résistance à ce genre de détérioration un rôle considérable. Par exemple, la bonne résistance à la mer des éprouvettes de béton du rapport *Campus* est certes en relation avec une structure très compacte. La composition, telle qu'elle est définie au rapport, donne un mètre cube de béton frais sans vides, avec un poids de 2388 kg par m³. Mise en œuvre au laboratoire en cubes de 16 cm de côté, ces bétons étaient vraiment très compacts. Après 20 années d'immersion dans l'eau douce, les cubes pesaient en moyenne 9,95 kg, ce qui correspond à 2426 kg/cm³.

Dans un tel béton, à 350 kg de ciment par m³, l'eau de mer ne parvient pas à pénétrer profondément. C'est prouvé par l'immunité des armatures des cylindres immergées à mi-marée et recouvertes de 1, 2, 3 et 5 cm de béton. Or, l'eau de mer corrode très fortement l'acier non protégé, surtout à mi-marée. Un tel béton, à surface extérieure étanche, tend même à s'étancher davantage, par la carbonatation sous

l'effet de l'air, par des enduits colloïdaux biologiques et des cristallisations de sels. Dès lors, il n'y a pas d'absorption ou d'imprégnation appréciables par succion capillaire.

Dans le cas des mortiers immergés à mi-marée, la compacité n'était pas aussi élevée. Néanmoins, pour un même ciment, l'effet de la compacité s'est manifesté très nettement par la différence de rapidité de destruction ou la différence de comportement des mortiers à 200, 300 et 400 kg de ciment par tonne de sable (le mortier du béton comporte 555 kg de ciment par tonne de sable).

L'auto-colmatage des bétons (ou mortiers) à structure très compacte ne se produit pas seulement par action superficielle extérieure. Elle se produit aussi par percolation. Le phénomène est connu de tous les laboratoires. Les essais de filtration à travers les bétons et les mortiers en vue d'étudier leurs propriétés de perméabilité sont très décevants. Même en recourant à des éprouvettes de mortier relativement maigre et peu compact, il se produit le plus souvent un auto-colmatage progressif, quelle que soit la qualité de l'eau employée, mais surtout si elle est saline. Des solutions de sulfates ou d'autres sels agressifs entraînent un colmatage rapide. Il faut des structures de mortiers exceptionnellement poreuses et de l'eau distillée pour que la perméabilité augmente progressivement. Ces observations de laboratoire ne concordent pas avec les constatations sur les constructions réelles, par exemple l'attaque biologique du béton de souterrains relatée au rapport *E. Janczewski*. Le rapporteur général a connu il y a plus de trente ans la destruction très rapide d'un tunnel de chemin de fer en béton exécuté dans la région de Liège sous un terril de charbonnage. Ce terril contenait beaucoup d'eau. Les particules de charbon sulfureux qu'il contenait avaient, par combustion spontanée et oxydation, formé de l'anhydride sulfurique. Par attaque des roches, il s'était formé des sulfates de sodium et de magnésium, qui existaient en forte concentration dans les eaux du terril. Celles-ci étaient en outre tièdes. Les concentrations atteignaient plus de 13 g de SO_4Mg et plus de 8 g de SO_4Na_2 par litre (cf. *Batta*, 10^e Congrès de Chimie industrielle, Paris 1930, éd. Chimie et Industrie). L'eau très agressive percolait avec abondance à travers le béton du revêtement comme le rapporteur général put le constater lors d'une visite au cours de la construction du tunnel. Le béton de ciment portland fut très rapidement détruit. La détérioration progressait à partir de la surface intérieure, où la concentration en sulfates était maximum, donc en sens inverse de la percolation, mais toute la masse était attaquée. Une tentative de reconstruction avec du ciment alumineux fondu échoua. On eut recours finalement à une maçonnerie de moellons de grès inaltérables, maçonnés à joints minces d'un mortier riche de ciment alumineux ou métallurgique, avec une chape extérieure d'étanchéité et un drainage à l'extérieur du revêtement pour écarter les eaux et empêcher leur percolation à travers la maçonnerie.

La différence de comportement des bétons de laboratoire et des bétons des constructions réelles est attribuable à des défauts de structure. La structure des bétons et mortiers de laboratoire est vraiment normale, c'est-à-dire relativement homogène. Les bétons réels présentent les défauts de structure indiqués lors de la définition de la structure normale, consistant en discontinuités localisées, qui sont les voies de pénétration de l'agent chimique agressif, par absorption, succion ou percolation. Les fissures et autres solutions de continuité d'origine mécanique ont le même effet. *M. E. Janczewski* indique dans son rapport que les souterrains dont le béton fut attaqué biologiquement présentaient des fissures causées par les mouvements du terrain. Dans la construction des souterrains, à Varsovie comme à Liège, les sujétions d'exécution contribuent d'ailleurs à réduire la qualité du béton.

Le rapport très documenté de *MM. Lhopitallier, Rives et Stiglitz* réalise presque une

synthèse de ces mécanismes de détérioration de la structure normale du béton par des agents d'agression chimiques, d'ailleurs faibles (à la différence des eaux d'exhaure, de lavage et des terrils des charbonnages de la région de Liège). Dans le cas qu'ils relatent, l'agression chimique s'est faite à la fois par percolation, c'est-à-dire à la surface extérieure, et par imbibition, c'est-à-dire à la surface intérieure, au plan d'eau et au-dessus. L'évaporation y produit une concentration et une cristallisation des sels agressifs. Abstraction faite des conditions climatiques particulières, qui ont permis ou favorisé l'évaporation de la solution agressive, sa concentration et la cristallisation des sels, la détérioration du béton est due au manque de compacité du béton et à la porosité des granulats, c'est-à-dire à une structure inférieure à la normale. Une contre épreuve rare et concluante est indiquée par les auteurs: la bonne tenue des cales des armatures, constituées de mortier très compact. C'est là un fait remarquable, d'autant plus que les mortiers sont en général moins compacts et plus vulnérables que les bétons.

Le rapporteur général a connu, en 1930, un cas comparable à celui du rapport de *MM. Lhopitallier, Rives et Stiglitz*, dans des conditions assez différentes toutefois. Il s'agissait des fonds de trémies pyramidales de grands silos à charbon d'une grande usine métallurgique de la région liégeoise. Les eaux contenues dans ces charbons étaient sulfatées et agressives. Elles s'accumulaient sur les parois des fonds de trémies. Celles-ci étaient en béton assez compact au ciment de laitier (mélange physique de chaux éteinte et de laitier basique de haut fourneau granulé et broyé). L'existence à la partie inférieure des fonds de trémie des dispositifs de fixation des clapets permettait une percolation de ces eaux, qui avaient attaqué superficiellement le béton à l'intérieur comme à l'extérieur. La détérioration était cependant faible et put être arrêtée par un enduit intérieur de fixol (brai de goudron dissous dans le benzol) et des trous de drainage.

Lorsque la structure discontinue et pénétrable du béton favorise l'attaque par les agents agressifs à l'état de liquide, de vapeur ou de gaz, selon l'importance de l'agressivité il y a dissolution, décomposition ou transformation des ciments accompagnée d'expansion importante, qui supprime toute liaison des granulats. Un agent d'agression particulièrement actif est constitué par les eaux minérales riches en acide carbonique libre ou naissant. Par exemple, aucun béton d'aucun ciment ne peut résister dans le sol de la ville de Spa.

L'action de l'eau de mer sur les bétons résulte d'effets combinés mécaniques, physiques, chimiques, biologiques et atmosphériques (cf. rapport *Campus*). Le rapport *I. Lyse* établit que le gel a un effet considérable dans la conservation marine. La nature des ciments a aussi une influence dans la détérioration par le gel et les agents agressifs. En général, les ciments les plus riches en chaux ont le plus de retrait et sont les moins résistants aux agents agressifs. La finesse de mouture agit dans le même sens, mais d'une manière moins prononcée.

La détérioration atmosphérique aussi est complexe: insolation, gel, humidité, pluie. Elle est assez lente dans les climats tempérés, bien que se marquant à la longue sur les bétons à structure peu compacte. Dans les climats extrêmes, elle est plus rapide, due surtout au gel dans les pays septentrionaux. Dans les pays tropicaux, une détérioration d'un autre type peut résulter des successions des saisons sèches et des pluies intenses. Le béton très deséché à la fin de la saison sèche est devenu de ce fait très poreux, sinon fissuré. Il absorbe alors des grands quantités d'eau très peu minéralisées, qui hydrolisent le ciment, dont les constituants sont entraînés par l'eau, en laissant éventuellement des efflorescences. La répétition saisonnière de ce processus finit par appauvrir à ce point le béton en liant qu'il devient très permé-

able et que les armatures du béton armé sont attaquées, ce qui provoque le commencement d'un processus de détérioration assez accéléré. (cf. rapport *Wolterbeek*, 1^{er} Congrès international du béton et du béton armé, Liège 1930). Des dégradations analogues peuvent se produire dans des locaux d'usine par condensation abondante de vapeur d'eau, toujours à la faveur de la structure discontinue. L'attaque par les eaux très douces est aussi la plus active pour les ciments les plus riches en chaux.

Un moyen pratique d'assurer une haute qualité de la structure du béton est la préfabrication. Il est possible économiquement, moyennant le soin et le contrôle voulus de la fabrication, d'égaliser et de surpasser la tenue des bétons de laboratoire. L'utilisation de blocs de plus en plus volumineux est courant pour les travaux maritimes, les ouvrages hydrauliques et les murs de soutènement. Des claveaux de béton de très haute qualité sont utilisés, à la connaissance du rapporteur général, pour les revêtements de puits et de galeries de mines à grande profondeur, soumis à la fois à des sollicitations mécaniques très élevées et à des agents agressifs. Si l'agressivité du milieu est très grande, les éléments préfabriqués peuvent être protégés par des enduits ou des traitements superficiels appropriés: silicates, fluosilicates, goudron, bitume, silicones, résines, laques, etc. . . . Ou subir des traitements de surface, par imprégnation liquide (silicates et fluosilicates) ou gazeuse (tétrafluorure de silicium).

En général, ces traitements plus ou moins profonds améliorent non seulement la durabilité, mais aussi la résistance par une modification améliorante de la structure superficielle, rendue plus compacte et étanche. Bien entendu, les retraits différentiels restent possibles, mais ne sont guère à craindre lorsque, comme c'est le plus souvent le cas, les éléments préfabriqués sont utilisés en milieu humide.

On ne peut affirmer que tous les éléments préfabriqués sont de haute qualité. On en trouve de déplorables, ce qui est une absurdité économique. Mais on peut atteindre des qualités élevées, par une excellente structure.

Les armatures du béton armé et du béton précontraint constituent de réelles perturbations de la structure du béton et y créent de nouvelles et importantes possibilités de détérioration. Il y a d'abord la perturbation géométrique ou spatiale, connue sous le nom d'effet de paroi, qui, en raison de l'importance relative des parois par rapport au volume des armatures, diminue la compacité. Cet effet est augmenté par la proximité des armatures des parois extérieures du béton, c'est-à-dire des parois de coffrage. Il en résulte une diminution géométrique de la compacité dans la région la plus vulnérable. Elle peut être considérablement aggravée en raison de l'obstacle que les armatures opposent à la mise en place et au serrage du béton, ce qui peut conduire à une véritable ségrégation par action de tamisage lorsque l'armature est très serrée. En conséquence, il y a une tendance à utiliser des bétons plus mous, c'est-à-dire contenant plus de fin et d'eau et possédant de ce fait une structure moins compacte. Le rapporteur général est d'accord avec *M. H. Lafuma* (cf. *Schweizer Archiv*, janvier 1958) qu'il faut recourir à une solution de compromis qui soit la plus favorable possible pour la structure finale et globale. Un béton très bien composé, mais trop sec, donne lieu à des vides macroscopiques dangereux. Mais un béton trop mou a une mauvaise compacité intrinsèque. Le problème est d'autant plus ingrat que les dimensions des pièces seront plus petites, les armatures plus importantes et plus serrées, les recouvrements plus faibles. La recherche prépondérante des hautes résistances du béton (cf. rapport *Jessing et coll.*), qui conduit à un allègement toujours plus poussé des structures et à une recherche sans frein de l'économie, fait naître de sérieuses questions de durabilité. Une saine conception de l'économie doit conduire à des formes et à des dimensions évitant l'excès d'armatures, ce qui est presque toujours possible. Les cas difficiles demandent des précautions spéciales dans la con-

fection du béton. Le recours aux plastifiants et aux entraîneurs d'air peut être utile.

Dans le béton armé, un retrait différentiel s'exerce par rapport aux armatures, dont le volume est invariable si elles restent intactes, mais gonfle si elles sont corrodées (expansion de la rouille). Il en peut naître des fissures parallèles aux armatures, d'autant plus facilement que le recouvrement de celle-ci par le béton est moins épais (cf. Hormigon y Acero, n° 16, 18, 19 et 20, 1935 et Revue Universelle des Mines, janvier et février 1936). Ces fissures très longues et assez ouvertes peuvent ouvrir l'accès aux armatures d'agents agressifs liquides ou gazeux, parmi lesquels simplement l'eau de pluie et l'air atmosphérique. Il peut en résulter une corrosion de l'armature, avec formation de rouille expansive. Dès lors la dégradation progresse rapidement selon le phénomène bien connu.

L'armature est cependant en principe protégée contre la corrosion par le milieu alcalin que constitue le béton qui l'entoure. Cette alcalinité peut subir une diminution progressive sous l'effet de la carbonatation par l'air et les eaux d'imbibition (cf. rapport K. Kosaka). Ce sera d'autant plus vite réalisé que le recouvrement sera moins épais et le béton plus poreux. Dans ce cas, les eaux pluviales aérées ou d'autres agents agressifs auront un accès assez facile aux armatures à travers le béton, qui peuvent être ainsi affectées par la corrosion. L'expansion de la rouille formée provoque alors rapidement la fissuration parallèle aux armatures et une détérioration accélérée.

Une controverse existe sur la formation des fissures longitudinales après ou avant leur corrosion. En fait les deux phénomènes existent. Si le premier est peut-être le plus fréquent, notamment sur les éléments préfabriqués en béton armé, en raison d'une qualité souvent médiocre, le rapporteur général a connu plusieurs cas de fissuration parallèles aux armatures avant corrosion de celles-ci (cf. Annales des Travaux Publics de Belgique, février 1935 et Rapport final du 5^e Congrès de l'association internationale des Ponts et Charpentes, Lisbonne 1956). La différence entre les deux processus n'est pas fondamentale. Le mécanisme de la détérioration réside toujours dans le retrait différentiel. Les résultats des deux processus sont les mêmes et aussi les précautions pour les éviter en milieu non humide en permanence.

En cas d'immersion permanente, il n'y a pas de retrait et seul le processus de pénétration d'agents agressifs jusqu'à l'armature peut en produire la corrosion; la fissuration est alors nécessairement postérieure à celle-ci. Il en résulte qu'une couverture de béton à structure très compacte, *même mince*, peut réaliser une protection durable des armatures. Cela a été constaté par des essais même en immersion marine permanente, aussi en exposition à l'air marin avec embruns et en immersion marine non permanente à mi-marée (cf. rapport *Campus*).

Dans cette dernière circonstance, en l'absence de toute fissuration, on a constaté une dénudation d'une armature après 20 ans, à la faveur de la détérioration propre du béton par l'action marine et atmosphérique combinée, pour une épaisseur de recouvrement d'un centimètre. Si l'on doit admettre que ce processus est assez rare, il a néanmoins été rencontré dans des cas pratiques (égouts écoulant des eaux très acides).

Ces constatations diffèrent assez sensiblement de celles des essais entrepris depuis 1929 par un Comité spécial de l'Institution of Civil Engineers de Londres (cf. National Building Studies, Research Paper n° 30, 1960). Des recouvrements en béton des armatures de 2,5 cm dans des piles de 12,5 cm de côté n'ont pas résisté à l'immersion dans l'eau de mer et même des recouvrements de 5 cm ont été défailants. Cette différence des résultats peut tenir aux conditions différentes des expériences et à la forme des éprouvettes. Dans l'esprit du rapporteur général, ils se complètent. Son attention n'est nullement de recommander de descendre l'épaisseur de recouvrement

du béton dans la mer à 1 cm, mais il lui paraît établi qu'un recouvrement de 5 cm de béton médiocre n'est pas davantage recommandable. Compte tenu des aléas d'exécution, il opte pour une épaisseur suffisante de recouvrement, adaptée aux circonstances, mais de béton compact et imperméable. Les deux éléments: dimension du recouvrement et compacité sont des questions de structure.

Le béton précontraint requiert en principe des bétons de haute résistance, c'est-à-dire ayant probablement une excellente structure. Il n'y a pas, dans ces conditions, de problème distinct concernant la durabilité du béton si les armatures n'y sont pas enrobées, ce qui est souvent recommandable. La question importante de la protection contre la corrosion des armatures fortement tendue et de leurs attaches est un problème sui généré étranger à ce rapport.

Le cas du béton précontraint proprement dit, à fils enrobés tendus avant bétonnage, n'est pas différent de celui du béton armé quant à la durabilité et généralement moins aigu.

Par contre, le béton postcontraint à câbles tendus à l'intérieur de canaux ménagés dans le béton durci pose un problème de tenue du mortier d'injection dont le caractère sérieux est établi par le rapport de *MM. Kowalski et Sloniewski*. Il a fait l'objet d'un Colloque international de la R.I.L.E.M., organisé par le Professeur *I. Lyse* en janvier 1961. Si la durée de sédimentation du ciment et son pouvoir rétentif d'eau (rapport *K. Kosaka*) ainsi que la durée de prise (rapport *Kowalski et Sloniewski*) ont sans doute de l'importance, elles ne sont pas propres à assurer une forme convenable à la structure du mélange ciment, eau et air, dont les éléments labiles ont une importance déterminante dans ce cas. L'emploi d'adjuvants est indispensable. *MM. Kowalski et Sloniewski* ont étudié avec de bons résultats les agents moussants pour la protection contre le gel. D'autres produits peuvent être utilisés. La question essentielle est de savoir s'ils ne permettent aucune séparation d'eau et d'air, s'ils ne sont pas rétractiles, s'ils sont assez adhérents et résistants tout en étant facilement injectables. Cela paraît donc un problème particulier, justifiant le colloque qui lui a été consacré.

Le béton armé et le béton précontraint se prêtent à la préfabrication. Par sa nature même, comme pour le béton armé, la préfabrication devrait assurer une bonne durabilité des produits, la structure pouvant être contrôlée et garantie. On est trop souvent loin de compte. Des impératifs techniques ou économiques font exiger des performances trop élevées des matériaux. Déjà en 1925, le rapporteur général exprimait des doutes au sujet des tensions admissibles élevées proposées en France pour le calcul des supports en béton armé de lignes électriques aériennes (cf. Revue générale de l'Electricité, 19 décembre 1925). Il s'agissait cependant de poteaux massifs, de section rectangulaire. Depuis lors, on a encore été bien plus loin, aussi dans la voie de l'emploi d'armatures de gros diamètre à faible recouvrement de béton. Mais ce n'est pas par manque de résistance mécanique que ces éléments périssent, c'est par manque de durabilité. La grande caractéristique des détériorations réside dans les fissures parallèles aux armatures, précédemment décrites et expliquées. Les fissures perpendiculaires aux armatures, auxquelles on pourrait s'attendre comme conséquence des hautes tensions de calcul, sont rares ou inexistantes. Elles sont d'ailleurs peu nocives et peu caractéristiques au point de vue de la détérioration des bétons et de la corrosion des armatures. Même dans des ouvrages où on les craint, comme dans les passages supérieurs au-dessus des voies de chemin de fer, exposés aux fumées des locomotives chauffées au charbon. La question de la fissuration transversale a été traitée en 1957 à Stockholm au Symposium de la R.I.L.E.M. sur l'adhérence et la fissuration dans le béton armé (Prof. *H. Granholm* et *G. Wästlund*). Le rapporteur général est en ac-

cord avec les conclusions des travaux de ce symposium concernant les relations entre la fissuration transversale du béton armé sous l'effet des sollicitations mécaniques extérieures et la corrosion des armatures. Elles le confirment dans ses opinions antérieures que ces fissures transversales sont peu actives dans le processus de détérioration du béton armé par corrosion des armatures. Bien entendu, cela ne signifie pas qu'elles soient admissibles. Elles constituent en tout état de cause une détérioration de la structure du béton armé, mais moins nocive que celle due aux fissures longitudinales.

Les performances élevées attendues du béton armé et du béton précontraint exigent que les auteurs de projets ne soient pas seulement versés dans les théories du calcul, mais qu'ils possèdent une connaissance approfondie des matériaux, de leur structure et des mécanismes de leur détérioration. Ceci doit permettre de concilier les exigences de la résistance et de la durabilité, pour satisfaire aux règles d'efficacité, de sécurité, d'aspect et d'économie.

Le problème est en quelque sorte unique pour le béton armé et le béton précontraint. Car si l'on parvient à éviter la corrosion des armatures et qu'elle contribue à la détérioration du béton, il faut en même temps assurer la durabilité propre du béton, car l'armature n'a plus aucun effet dans un béton dont la structure est détériorée, c'est-à-dire qui a perdu toute résistance au cisaillement et à l'extension.

En résumé, en toutes circonstances, le béton résistera d'autant mieux aux causes de détérioration prévues ou imprévues que sa structure sera meilleure. Cela implique :

1. L'emploi de granulats de qualité, connus et contrôlés. Ils seront durs, non réactifs, ni absorbants, ni gonflants, ni gélifs. Leur répartition granulométrique sera la meilleure possible.
2. L'emploi de ciments de bonne qualité connus et contrôlés en quantité appropriée. Ils ne seront pas trop riches en chaux; leur retrait sera aussi faible que possible de même que leur chaleur d'hydratation.
3. Le rapport ciment: eau sera aussi réduit que le permet la maniabilité exigée pour l'application. L'emploi d'adjuvants plastifiants et d'entraîneurs d'air peut-être avantageux pour augmenter la maniabilité sans excès de sable et d'eau.
4. La mise en œuvre du béton sera telle qu'elle réalise un béton ayant la plus grande homogénéité et la plus grande compacité possibles, sans ségrégation, ni vides ni reprises défectueuses.
5. La cure aura lieu dans les conditions d'humidité les plus favorables et à l'abri de toutes conditions favorisant une élévation de température et une dessiccation rapide. Aussi bien entendu à l'abri du gel.
6. Pour le béton armé (comme pour le béton précontraint), on veillera à un écartement et à un recouvrement suffisant des armatures en rapport avec leur diamètre et les dimensions maxima des granulats. Les armatures seront disposées de manière à permettre une parfaite compaction du béton.
7. L'emploi de ciments spéciaux réputés résistants aux agents agressifs ne dispense pas des conditions précédentes, qui sont capitales.
8. Lorsque les conditions d'exécution rendent difficiles une mise en œuvre assurée (travaux souterrains, maritimes, sous eau), le recours à la préfabrication des éléments en béton est recommandable. Egalement lorsque l'action d'agents agressifs est à craindre; les éléments préfabriqués peuvent alors être protégés contre la détérioration par des traitements spéciaux.

COMPLÉMENT AU RAPPORT GÉNÉRAL PRÉSENTÉ LE 1^{er} AOÛT 1961

Je ne lirai pas le rapport général que le Comité organisateur m'a fait l'honneur de me confier. Je tâcherai d'en faire un résumé systématique en rendant compte sommairement des nombreux rapports particuliers du thème II, notamment de ceux qui me sont parvenus après le dépôt du rapport général.

1. *Jessing, Kjaer, Larsen et Trudsoe* présentent un rapport développé sur les réactions entre les alcalis du ciments et certains granulats danois, qui sont des silex opalins. L'étude très détaillée explique et décrit les détériorations graves du béton que ces réactions engendrent dans des conditions où l'eau peut pénétrer en abondance dans le béton, principalement les eaux salines. Le rapport se termine par des recommandations provisoires pour éviter ces dégradations. Les précautions proposées varient suivant l'humidité ambiante. Dans les cas de risques importants, les granulats réactifs sont à proscrire.

Snowdon présente un rapport circonstancié sur les dégradations rapides et importantes du béton résultant de l'emploi de granulats rétractiles et expansifs. Il s'agit de roches écossaises, principalement, des dolérites. Le cas avait été signalé en Afrique du Sud par *Stutterheim*. Il s'agissait là de granulats provenant de roches sédimentaires.

Les deux types de granulats, réactifs et expansifs, produisent la dislocation du béton par retrait ou dilatation différentiels; ils constituent des agents actifs de détérioration.

T. Nishi et *H. Nagashima* étudient la durabilité de béton de pierre ponce (1^{er} rapport) et son comportement dans des solutions acides diluées ou salines (2^e rapport).

Y. Koh et *T. Hattori* traitent des conditions auxquelles doivent satisfaire les gros granulats pour assurer la durabilité du béton. Ils concluent à l'effet néfaste des granulats tendres.

Comme dans le cas de la pierre ponce, il s'agit de granulats de qualité plus ou moins médiocres, peu durs, poreux, absorbants ou gélifs, qui constituent des causes passives de détérioration.

En vue de confectionner des bétons ayant une structure normale susceptible d'assurer une résistance normale aux causes de détérioration, il faut avoir recours à des granulats de qualité, connus et contrôlés comme durables, c'est-à-dire qui soient durs, non réactifs, ni absorbants, ni gonflants, ni gélifs, en un mot *inertes*, comme on les qualifie souvent. Leur état de surface doit aussi être tel qu'une bonne adhérence à la pâte liante de ciment puisse être assurée. L'expérience suivante faite il y a plus de trente ans établit l'importance de l'état de propreté des granulats. Des éprouvettes de béton ont été confectionnées à la même composition à partir d'un gravier de rivière tout-venant 0/50 mm malpropre, en employant:

1. le gravier à l'état naturel;
2. le gravier lavé à l'eau froide;
3. le gravier lavé dans une solution chaude de carbonate de soude;
4. le gravier lavé comme en 3 et le résidu sec du lavage ajouté au béton.

Les résistances à la compression se sont classées dans l'ordre 4, 3, 2 et 1, le béton 1 étant considérablement inférieur aux trois autres.

Un béton de structure normale, composé au moyen de tels granulats, comporte en plus la pâte de liaison, formée de ciment, d'eau (dans divers états) et d'air. Cette pâte, indispensable pour assurer la cohésion du béton, constitue cependant l'élément exposé à la détérioration (étant donné que nous admettons dorénavant le caractère durable et inerte des granulats).

Cette phase seule susceptible alors de détérioration est aussi *labile*, c'est-à-dire que son état varie dans le temps et d'après les circonstances extérieures (solicitation, température et humidité). Cet état est aussi dépendant des conditions initiales de la mise en œuvre, ainsi que des précautions prises pendant la période initiale de durcissement. Il est donc aussi influencé par ses relations avec les granulats inertes, en fonction de la granulation et du serrage du béton.

On admettra qu'un béton durci a une structure normale lorsqu'il comporte des granulats durables inertes et la pâte liante de ciment dans des proportions convenables pour être aussi compact qu'il est possible et qu'il convient pour l'application, qu'il ne comporte pas plus qu'une proportion normale de défauts d'exécution et qu'il est exempt de défauts graves (ségrégations, nids de gravier, joints de reprise défectueux, fissures, vides, etc). Cette structure, fondamentalement hétérogène, sera cependant aussi uniforme, aussi macroscopiquement isotrope que possible.

2. En absence de toute cause active externe de détérioration et en ne considérant pas le cas particulier de l'immersion permanente dans une eau non agressive, le béton de structure normale subit des changements au cours du temps. Dans l'ambiance atmosphérique, la résistance à la compression et la rigidité augmentent avec l'âge, mais en même temps se produit le retrait, dû à l'évolution des constituants de la pâte de ciment, principalement de la phase eau.

Le rapport de *M. Kondo*, relatif à l'influence de la nature du ciment et des conditions de durcissement initial (cure) sur la tendance à la fissuration rappelle les différences bien connues d'ordre de grandeur du retrait des pâtes de ciment, des mortiers et des bétons. Il en résulte que les granulats inertes entravent le retrait de la pâte de ciment et y font naître des tensions de retrait, qui sont des tractions. Celles-ci peuvent faire naître des fissures dans la pâte de ciment et le mortier (cfr. figure 1).

A Cornell University, *G. Winter* et *F. Slate* étudient actuellement, par la radiographie de lames minces de béton, la formation de ces fissures, qu'ils appellent *micro-cracks*. Dans certaines circonstances, ces micro-fissures peuvent se produire aux parois des granulats et affecter ainsi leur adhérence à la pâte liante de ciment. Les variations de l'humidité de la pâte de ciment sont d'ailleurs susceptibles d'y faire naître des fissures, comme le montre l'expérience macroscopique reproduite à la figure 3. Un disque circulaire de ciment, soumis à une pression d'eau suivant un cercle concentrique de la moitié de son diamètre s'est rompu diamétralement en raison du gonflement de la partie centrale. Des dilatations thermiques différentielles entre les granulats et la pâte de ciment peuvent contribuer à la génération de ces fissures.

Il semble que, ainsi, en dehors de toute action agressive, le vieillissement du béton peut produire non à proprement parler une détérioration, du moins une *altération* de ses qualités. Hors d'une poutre conservée dans la cour de mon laboratoire depuis 14 ans, j'ai fait prélever très récemment à l'intention de ce colloque de nombreuses éprouvettes. Ces expériences étant imprévues, je ne puis vous donner les caractéristiques mécaniques de ce béton à 1 ou 3 mois d'âge. Mais sa composition doit être sensiblement la même que celle des bétons figurant dans mon rapport particulier sur les

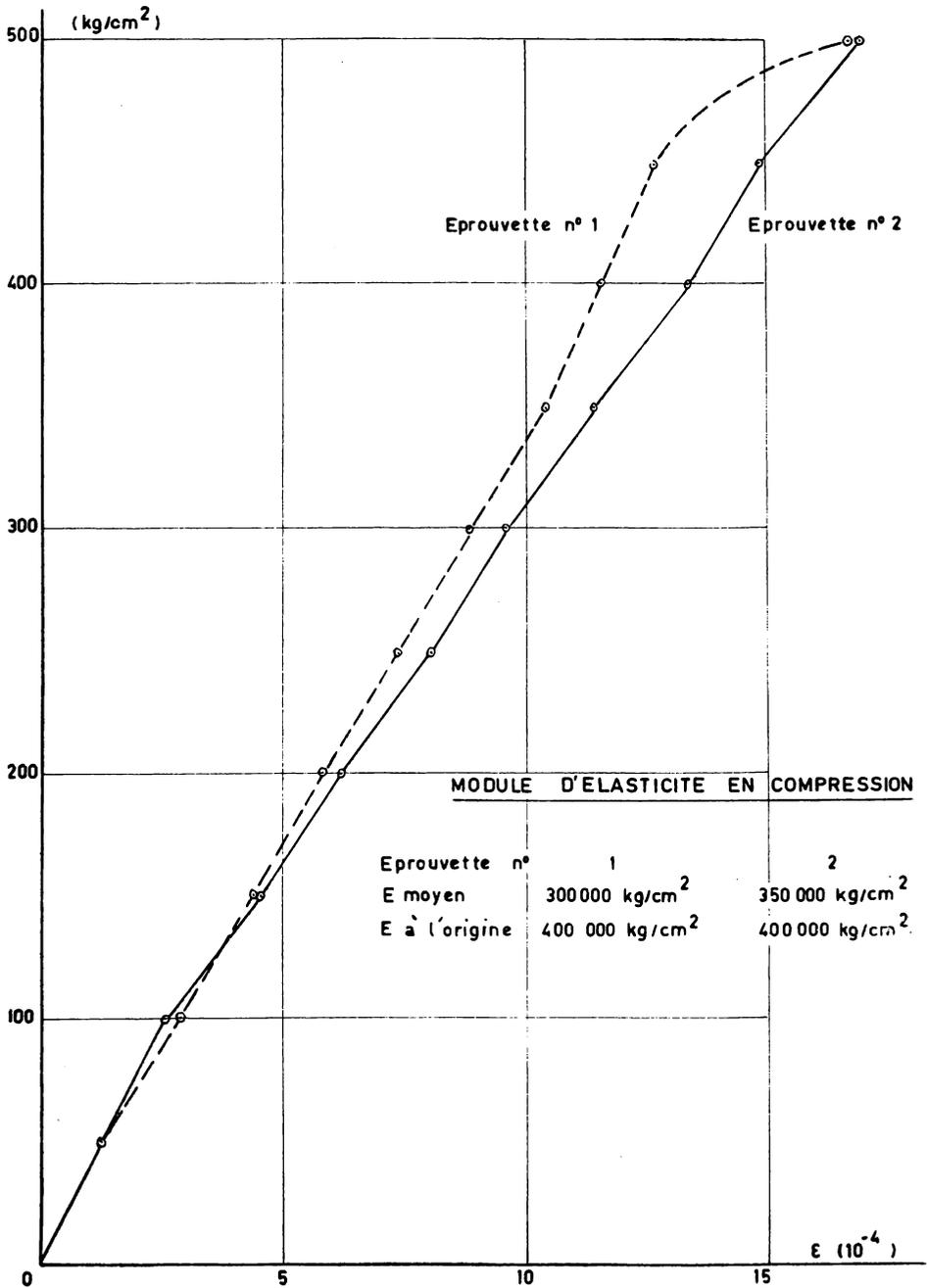


Fig. 4. Module d'élasticité en compression.

essais de résistance des bétons à l'immersion marine correspondant à une résistance de l'ordre de 350 kg/cm^2 à 28 jours.

Après 14 ans, la résistance à la compression sur éprouvettes cylindriques de 100 cm^2 de section et 10 cm de hauteur est 695 kg/cm^2 (moyenne de 6 éprouvettes).

La résistance à la traction directe sur éprouvettes cylindriques de même section et de 18 cm de hauteur est $23,3 \text{ kg/cm}^2$ (moyenne de 3 éprouvettes)

$$\text{Rapport } \frac{695}{23,3} = \sim 30.$$

Par l'essai brésilien, on obtient comme résistance à la traction $35,6 \text{ kg/cm}^2$ (moyenne de 6 éprouvettes)

$$\text{Rapport } \frac{695}{35,6} = 19,5.$$

Je ne puis citer les valeurs des rapports correspondants à 28 jours, mais ils étaient certes d'un moindre ordre de grandeur. Le béton devient donc de plus en plus fragile

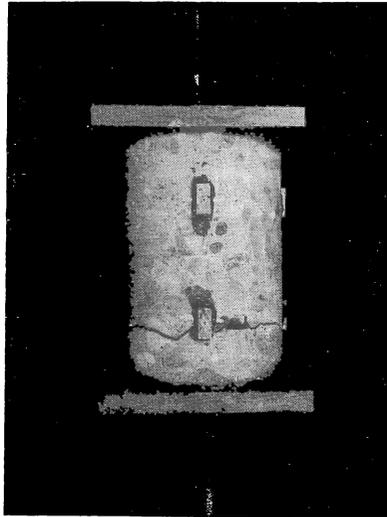


Fig. 5. Eprouvette de traction.

à mesure qu'il vieillit. Les courbes de déformation jusqu'à la rupture en témoignent, tant à la compression qu'à la déformation (figures 4: compression — 5: éprouvette de traction — 6: traction). La déformation moyenne à la rupture par compression est environ $1,7 \cdot 10^{-3}$. A la traction $0,34 \cdot 10^{-3}$. Le béton est donc devenu rigide et fragile.

Ce processus de vieillissement, en dehors de toute détérioration est certes défavorable, car il correspond à une diminution relative de la caractéristique la plus faible du pouvoir de liaison de la pâte de ciment, la résistance à la traction.

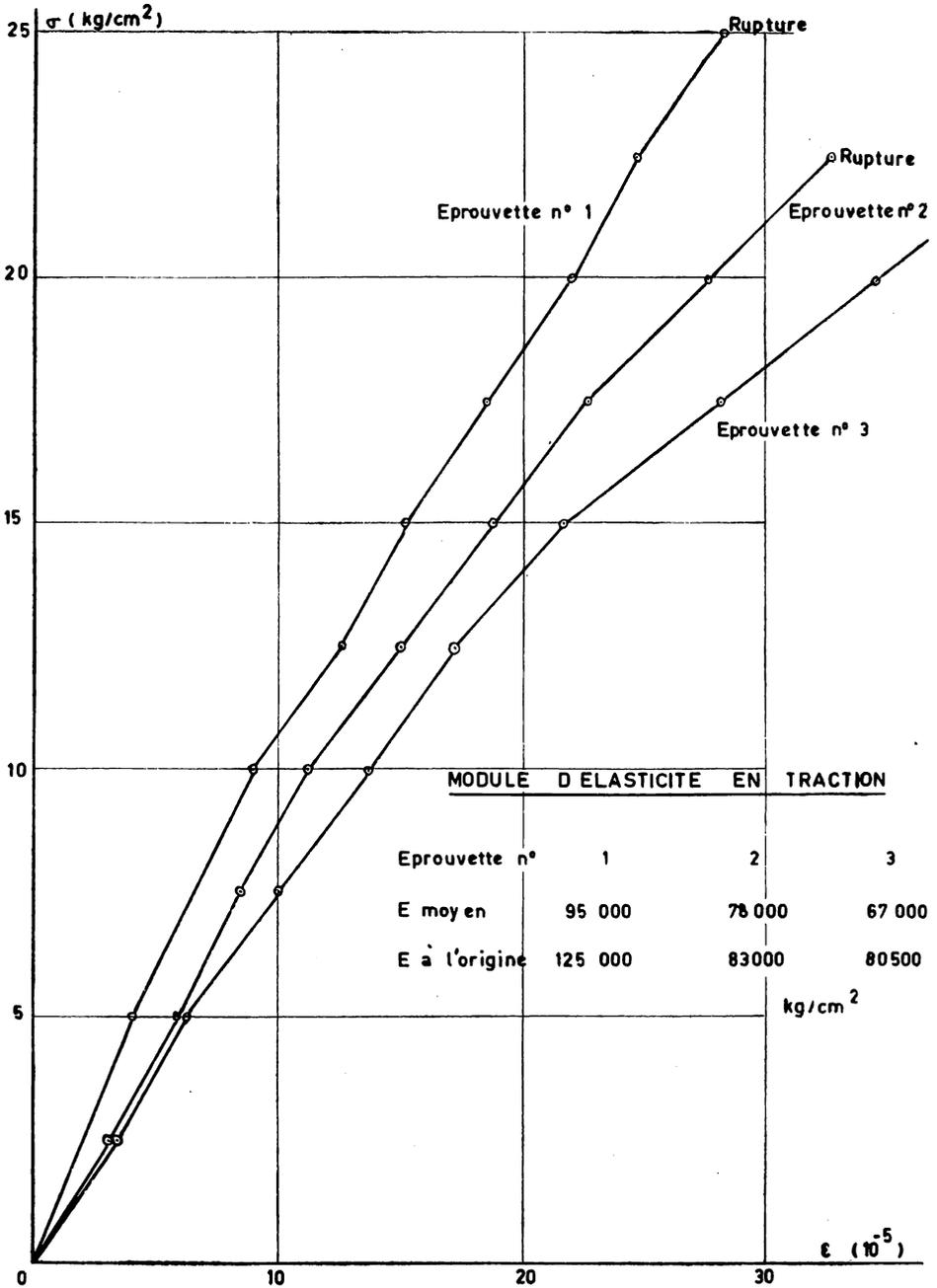


Fig. 6. Module d'élasticité en traction.

3. La détérioration de la structure normale porte, selon l'hypothèse admise de l'inertie totale des granulats, sur la destruction de la liaison de ces granulats par la pâte de ciment. On écartera toutefois de la mécanique de cette détérioration la destruction chimique pure et simple (ou vive) de la pâte de ciment par des agents agressifs chimiques violents (acides fort concentrés, solutions salines concentrées, liquides et acides organiques, etc...). On écartera également les causes purement mécaniques extérieures de destruction (actions des forces, des chocs, des déformations) etc. . . ., qui relèvent de la résistance des matériaux. On considérera donc seulement la mécanique des autres causes de détérioration de la structure normale:

- 1°. actions physiques, généralement thermiques, résultant des conditions climatiques,
- 2°. actions chimiques faibles et biologiques de l'ambiance.

Les actions physiques ne changent pas la nature chimique de la pâte liante de ciment (du moins pas fondamentalement), mais sont susceptibles de désagréger la pâte liante par le développement et la généralisation de sa fissuration. Le mécanisme le plus général est celui de retraits et de dilatations différentiels internes, développant des tensions de traction dans la pâte liant de ciment, qui vont jusqu'à la rupture complète de liaison.

Un élément exposé à ce gonflement est l'eau libre, susceptible d'expansion par le gel aux basses températures atmosphériques, ainsi qu'il est bien connu.

Plusieurs rapports ont été présentés sur la gélivité du béton.

Celui de *Warris* cherche à dégager des facteurs en rapport avec la structure qui permettraient d'apprécier la résistance au gel du béton durci. Il conclut que la question doit faire l'objet d'essais longs et difficiles.

Le Professeur *I. Lyse* montre dans son rapport que l'immersion dans l'eau salée accélère considérablement la destruction du béton par le gel. Il recommande une forte proportion d'entraînement d'air.

J. Mioddecki fait un exposé de la question des entraîneurs d'air, très adéquat au sujet de la structure des bétons. Il montre en effet que l'effet des entraîneurs d'air est moins un contrôle de la quantité d'air que de la structure des vides d'air, sous forme de bulles de dimensions limitées (de l'ordre de 0,1 mm) empêchant la formation de cavités beaucoup plus grandes et de formes plus défavorables. *J. Bolomey* attribue un effet très néfaste sur la résistance au gel des bétons aux cavités allongées et importantes qui se forment sous les gros granulats, surtout de forme plate, lors de la remontée de l'eau ou de l'air dans les bétons très mouillés ou les bétons vibrés. Des lames d'eau libre importantes peuvent s'y former et leur congélation peut exercer des pressions qui conduisent à l'écaillage progressif par le gel.

Le Professeur *S. A. Mironov* expose dans son rapport la résistance au gel des bétons durcis à la vapeur ou dans l'eau chaude ou autoclavés. Il résume les résultats obtenus par divers chercheurs de l'U.R.S.S. Il en résulte que la question est très complexe et qu'un traitement thermique sans précaution peut compromettre l'adhérence de la pâte de ciment aux granulats, réduisant ainsi la résistance au gel. C'est la conséquence de dilatations différentielles thermo-hygro-métriques. Le rapport traite aussi des bétons légers poreux, dont la résistance au gel peut être élevée en raison de leur structure particulière.

On a remarqué depuis longtemps qu'il est difficile de discerner une relation entre la gélivité naturelle des matériaux et les essais accélérés de gel et de dégel alternés. C'est que de nombreux facteurs influencent fortement les phénomènes: degré de saturation, mode de saturation, rapidité de congélation, propagation du gel dans les matériaux, etc. . . . Il en résulte d'importantes différences entre les conditions de gel

naturel et celle des essais accélérés. Malgré que la signification des essais accélérés de gel et de dégel alternés soit mal établie et malgré la difficulté de leur normalisation, il existe une tendance à y recourir pour définir un coefficient de durabilité du béton.

T. Nishi et H. Nagashima ont recours à un tel facteur dans leur rapport sur la durabilité des bétons de pierre ponce. Implicitement, la notion figure aussi dans les rapports de Y. Koh et T. Hattori.

La notion du facteur de durabilité n'est pas seulement dépendante d'une normalisation significative de l'essai accéléré de gel et dégel, mais aussi du choix du critère de mesure du degré de détérioration. La résistance mécanique est très sensible aux déformations géométriques résultant de la détérioration de la structure. Elle exige aussi de nombreuses éprouvettes, d'ailleurs nécessairement affectées de dispersion, et des éprouvettes témoins, sujettes à la même réserve.

La détermination du module dynamique permet d'opérer sur une éprouvette unique, mais elle caractérise la détérioration par rapport à l'état initial de l'éprouvette et non par rapport à l'état contemporain de l'éprouvette non soumise au gel et dégel alternés. Il y a donc un effet perturbateur de temps. En outre, il n'est pas certain que la décroissance du module dynamique soit en relation constante avec la résistance. La figure 7 montre les courbes de relation entre le module dynamique par

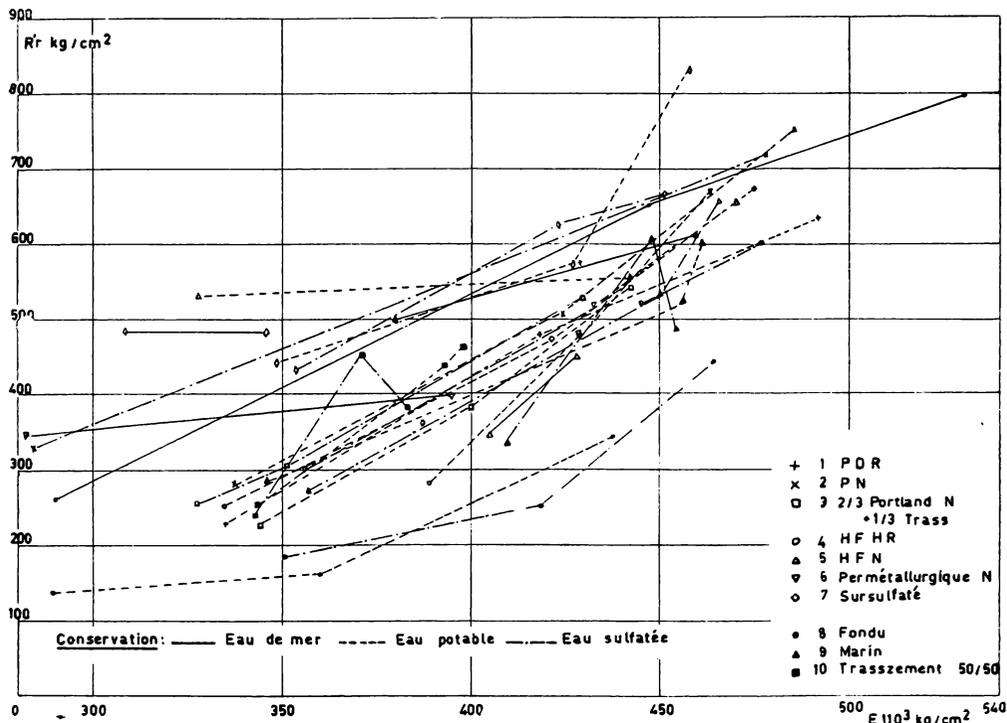


Fig. 7. Relation entre le module dynamique et la résistance à la compression.

résonance longitudinale et la résistance à la compression pour les barrettes de divers mortiers retirés de la mer, de l'eau sulfatée et de l'eau douce, dont il est question dans mon rapport particulier. On voit que la variation est assez étendue.

La notion d'un facteur de durabilité basé sur la résistance au gel est une notion intéressante qui devrait faire l'objet d'études très approfondies. On pourrait mettre en parallèle un essai de durabilité par immersion et émergence alternées dans une solution saline (rapports *Y. Koh* et *T. Hattori*, ainsi que *T. Nishi* et *H. Nagashima*), qui est certes plus simple que l'essai accéléré de gel et dégel alternés, mais dont la signification demande aussi à être précisée. Mentionnons aussi, par acquit de conscience, la possibilité de détérioration par les températures élevées soit atmosphériques (surtout dans les pays tropicaux, par l'alternance des saisons sèches et humides) soit accidentelles (incendies).

4. Les facteurs chimiques et biologiques de détérioration peuvent être considérés ensemble.

Le rapport *E. Janczewski* établit en effet que les détériorations importantes produites dans un souterrain à Varsovie par des champignons ont procédé à partir des éléments chimiques sécrétés par ces champignons, qui leur ont permis de traverser le béton de l'extérieur vers l'intérieur à la faveur de sa structure discontinue. Dans ce cas, comme dans d'autres connus par le rapporteur général, des dislocations mécaniques ont contribué à faciliter cette perforation du béton.

Lhopitalier, Rives et *Stiglitz* décrivent et expliquent un cas très intéressant, parce que polyvalent, d'agression chimique de canaux d'irrigation en béton par des eaux légèrement salines qui s'y écoulent.

On y trouve le même type d'attaque que dans le rapport précédent. Percolation de la solution à travers le béton poreux avec évaporation à la surface extérieure à la faveur de circonstances climatiques particulières. L'agent agressif salin se concentre ainsi à la surface et peut finalement désorganiser la pâte liante par cristallisation. En même temps, dans les canaux en question, une attaque des faces internes se faisait au niveau du plan d'eau et au-dessus, par imbibition, évaporation, concentration et cristallisation des sels agressifs. L'exactitude du processus a été vérifiée par reproduction au laboratoire. La structure discontinue et poreuse du béton a permis ces phénomènes, accompagnés d'une contre-épreuve rare et concluante: l'intégrité des cales des armatures, enrobées dans le béton détruit et constituées d'un mortier très compact.

Le rapport *I. Lyse* a établi la gravité de l'action conjuguée du gel et de l'eau de mer.

Le rapport *F. Campus* donne une synthèse des résultats d'observations effectuées de 1934 à 1954 sur de nombreuses éprouvettes de mortiers et de bétons, confectionnés au moyen de divers ciments et immergés à mi-marée dans l'avant-port d'Ostende.

Le programme assez varié des essais permet de distinguer les divers effets, notamment de la nature chimique des ciments et de la compacité. Ce dernier facteur est prédominant. Les intempéries, notamment le gel, exercent certes une action importante, de même que l'agitation marine. Les formes également: les discontinuités telles que les arêtes et les sommets vifs sont très vulnérables. Mais il semble établi qu'un béton de bonne structure normale compacte, s'il n'est pas exempt de tout risque d'attaque superficielle, d'ailleurs lente et ralentie par le colmatage superficiel par les organismes marins, est à l'abri d'attaques profondes par pénétration, sous réserve d'absence de défauts importants d'exécution.

5. La question de la mécanique de la détérioration du béton armé et du béton précontraint est entièrement liée à la structure. L'armature perturbe fortement la structure normale du béton. Géométriquement, par effet de paroi, aggravé fortement

par le voisinage des parois de coffrage. Ces effets culminent aux arêtes. Ils ont pour conséquence une diminution locale de compacité, très désavantageusement placée. Ces effets sont d'autant plus grands que les diamètres des armatures sont plus grands, que les distances aux parois sont plus petites et le rapport des deux plus petit. Le béton au voisinage des armatures est donc plus vulnérable qu'ailleurs aux détériorations précédemment examinées.

Le volume de l'armature est pratiquement invariable. Le béton de l'enveloppe subit en tous sens un retrait, qui peut être majoré au voisinage de l'armature, en raison de la proximité de la surface extérieure et parce qu'il y a un enrichissement local en mortier. Ceci peut produire dans certains cas des fissures parallèles aux armatures. Ces fissures parallèles aux armatures sont très fréquentes et en général beaucoup plus nocives que les fissures transversales, dues par exemple à la flexion.

Ces fissures ne sont pas toujours dues au retrait différentiel. Elles peuvent résulter de la pénétration d'agents agressifs liquides ou gazeux, ou simplement d'eau et d'air jusqu'aux armatures, à la faveur de la porosité du béton. Cependant l'armature est dans un milieu alcalin et ce n'est qu'à la longue, par neutralisation de l'alcalinité du béton par carbonatation, que la corrosion de l'armature peut commencer. Quoi qu'il en soit des détails complexes de la génération de la corrosion des armatures *sous béton*, lorsque celle-ci se développe, l'expansion de la rouille formée produit aussi des fissures parallèles aux armatures. Dans les deux circonstances de génération des fissures parallèles aux armatures, celles-ci permettent un large accès de l'eau et de l'air aux armatures, leur corrosion se développe et l'expansion de la rouille conduit aux détériorations bien connues et à une ruine qui s'accélère alors rapidement.

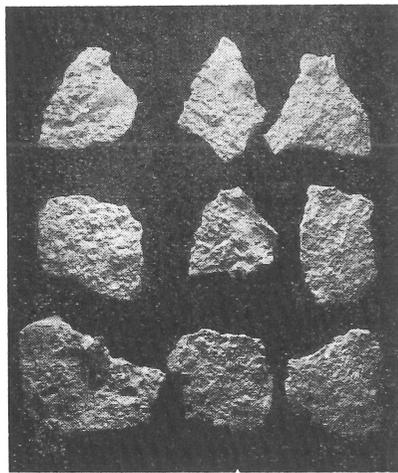
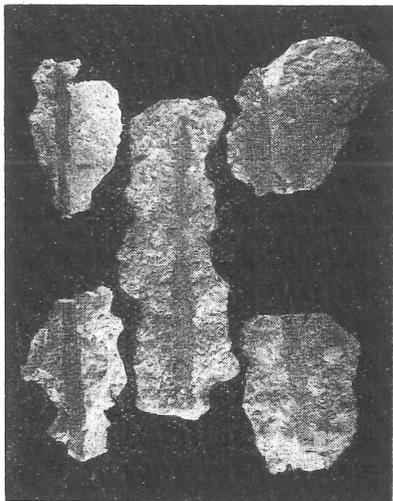


Fig. 8. ▲ Éclats du béton provoqués par la rouille préalable de l'armature (réfrigérant hyperbolique).

Fig. 9. Éclats du béton en dehors de toute armature, de petites dimensions (même réfrigérant).

Le rapport *K. Kosaka* étudie notamment la carbonatation des bétons en vue de l'appréciation de leur pouvoir protecteur des armatures.

Le rapport du Professeur *V. M. Moskvine*, après avoir résumé et classifié les types de détérioration du béton, traite de la protection des armatures par le béton et de

l'épuisement éventuel de cette protection. Il souligne l'effet des actions climatiques, notamment du gel et recommande dans certains cas l'emploi d'inhibiteurs de corrosion de l'acier et d'adjuvants du béton.

Dans les cas graves, il recommande l'emploi de protections superficielles qui doivent mettre le béton à l'abri de la pénétration d'agents corrosifs, ce qui atteint à la limite du sujet. Il existe effectivement un troisième processus de corrosion des armatures, qui consiste dans leur dénudation par l'action prolongée de causes agressives lentes (eau de mer) ou l'action de causes très vives (fig. 11: attaque de canalisations en béton armé par les eaux résiduares très acides d'une usine de galvanisation).

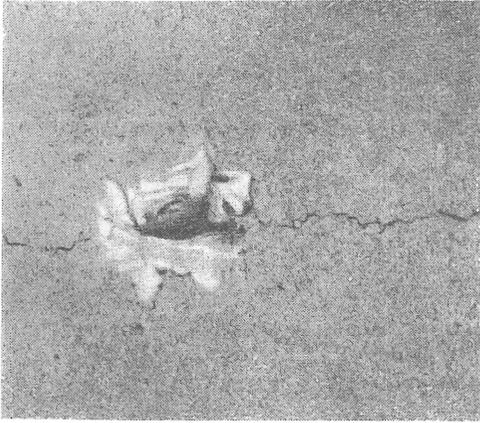


Fig. 10. ▲ Fissure avant la corrosion de l'armature.

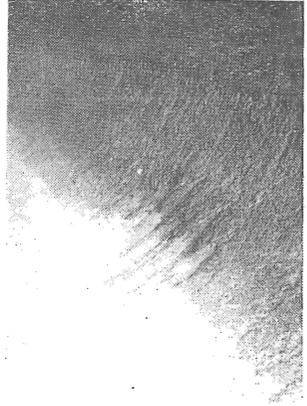


Fig. 11. Attaque du béton armé de canalisation par les eaux acides.

Le Professeur *Moskvin* attire l'attention sur l'action combinée de contraintes mécaniques, principalement de traction, et d'agents de détérioration, tels que le gel et dégel alternés. Il conclut que le béton précontraint étant comprimé, doit avoir une plus grande durabilité.

Certains de ces points feront certes l'objet de recherches ultérieures. Les opinions sur l'effet des inhibiteurs de corrosion sont encore divergentes (mais cette question est probablement étrangère à la mécanique de la détérioration de la structure normale du béton). Certaines publications américaines relatent qu'il n'y a pas de différence entre le comportement aux gels et dégel alternés du béton ordinaire et du béton précontraint. Les conditions d'expérience peuvent certes exercer une grande influence. Le béton mis en œuvre en vue de la précontrainte doit être normalement de haute qualité. Mais la précontrainte n'est pas susceptible d'améliorer la structure éventuellement défectueuse d'un béton, par exemple, en cas de porosité ou de perméabilité.

Le rapport *Kowalski* et *Sloniewski* attire l'attention sur un problème très sérieux du béton postcontraint, celui de la destruction par le gel de l'eau décantée du mortier d'injection dans les gânes de passage des câbles. Problème pratiquement très réel, mais très spécial et pour lequel les auteurs proposent une solution bien définie.

6. Ayant terminé la revue des rapports présentés sur le thème II, qui couvrent au total un large domaine, sans rendre compte de tous les cas particuliers, il y a lieu de remarquer que dans les cas réels de dégradation, le plus souvent des causes multiples sont combinées, mais qu'en général, elles contribuent à un même mécanisme de la détérioration de la structure normale: dislocation de la pâte de liaison du ciment par retrait et dilatation différentiels, en dehors des actions éventuelles de destruction chimique de la liaison. Il va de soi que les effets mécaniques: forces extérieures, chocs, charges répétées, frottement, usure, peuvent encore contribuer au processus de détérioration, qui procède finalement de la faible résistance à l'extension du ciment.

Comme direction des recherches ultérieures, on peut envisager:

1. L'étude de l'évolution de longue durée de toutes les caractéristiques mécaniques du béton dans le temps, en l'absence de toute action extérieure agressive.
2. L'étude des possibilités de vieillissement thermique accéléré et de ses effets, selon les mêmes modalités.
3. Etude de l'évolution de la structure des bétons au cours du vieillissement naturel et du vieillissement artificiel, par les méthodes de la physique moderne (macrographies et micrographies diverses, diffraction, etc. . . .)
4. La poursuite de l'étude de critères de durabilité des bétons dans diverses conditions d'emploi en rapport avec leur structure et leur compacité. Cela implique la recherche.
 - a) du processus de détérioration le plus approprié;
 - b) du critère de mesure le plus approprié du degré de détérioration;
 - c) l'examen de l'évolution correspondante de la structure par des moyens de la physique moderne.

En plus de ces problèmes généraux et fondamentaux, il en reste certes de plus particuliers et spéciaux dont il semble impossible de définir ou de limiter le choix, attendu que ce sont généralement des circonstances précises qui les font naître.