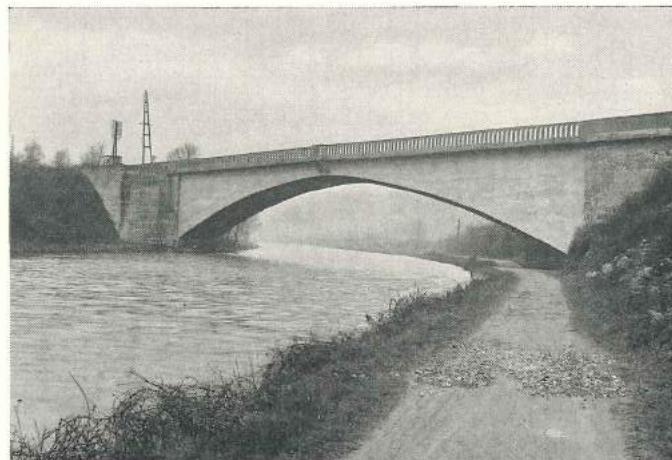




LE CALCAIRE DANS LES BÉTONS DE CIMENT



Le pont Candelier à Landelies

2^{me} EDITION

BRUXELLES

—
1961

SOMMAIRE

La résistance à la traction et à la compression des bétons de calcaire n'est pas inférieure à celle des bétons fabriqués avec les autres matériaux durs d'usage courant en Belgique.

Elle est due à la fois à une résistance élevée de la pierre calcaire employée (de l'ordre de 2.000 K/cm² et parfois davantage) et à une forte adhérence entre la pâte de ciment hydraté et les grains de calcaire.

De cette adhérence, particulière au calcaire, (et aussi à la dolomie), qui est de nature physico-chimique, font foi la résistance élevée à la traction des mortiers au poussier de calcaire et la forte résistance à l'arrachement des enduits de ciment, ou de mortier de ciment, posés sur des roches calcaires.

La résistance aux intempéries, notamment au gel, des bétons de calcaire ne diffère en rien de celle des bétons confectionnés avec d'autres matériaux. Les bâtiments et ouvrages d'art en béton de calcaire, dont certains ont plus de trente ans, ne manifestent aucune dégradation qui puisse être imputée à la gélivité du calcaire.

Il n'y a pas lieu d'exclure les bétons de calcaire des constructions qui pourraient être incendiées, car, bien avant d'atteindre la température de décomposition du calcaire, soit 900° C, les bétons, armés ou non, et quelle que soit la nature de leurs matériaux inertes, sont tellement endommagés par le feu qu'ils ne sont plus utilisables.

Il existe des routes en béton de calcaire ; leur durabilité ne paraît pas inférieure à celle des routes construites avec d'autres pierailles ou poussières. La question de savoir si la nature minéralogique des matériaux inertes a une influence sur la glissance des routes en béton est à l'étude.

Depuis 1953, des cahiers généraux des charges du Ministère des Travaux Publics et de la Reconstruction contiennent des clauses qui consacrent la mise sur un pied d'égalité, en tant que constituants inertes des bétons, du porphyre, du quartzite, du grès, du calcaire, du gravier de rivière, du laitier basique de haut fourneau.

LE CALCAIRE DANS LES BÉTONS DE CIMENT

Le Béton de calcaire avant la guerre.

Avant 1930, le calcaire était déjà employé dans la fabrication des bétons de ciment.

Les carrières de porphyre, de grès et de quartzite fournissaient et fournissent encore des pierailles et des poussières dont la qualité est bien connue ; on ne peut leur faire aucun reproche en ce qui concerne leur dureté, leur propreté, leur durabilité.

Le laitier concassé de haut fourneau avait depuis longtemps, fait son apparition ; mais les plus gros utilisateurs étaient encore les usines métallurgiques qui employaient avec succès les bétons de laitier dans leurs constructions.

D'autres matériaux étaient et sont encore utilisés par les constructeurs d'ouvrages hydrauliques. Ce sont les graviers et sables de rivière. On en a importé de Hollande et on en a extrait du lit de la Meuse principalement entre Namur et Visé. Après avoir, pendant longtemps, rejeté en rivière les gros galets qui sont dragués en même temps que le gravier et le sable, on en a tiré parti par concassage.

Il importe cependant de mentionner que, dix ans plus tôt, un ouvrage remarquable, en béton armé avait été construit au moyen de pierrière de calcaire viséen : il s'agit du pont Candelier, un pont-rail en arc à deux articulations qui franchit la Sambre à Landelies (Jambe de Bois) sous la ligne de chemin de fer Paris-Cologne. A cette époque, si l'on avait déjà réalisé des ponts-routes de grande portée en béton armé, le record était détenu par le pont de Saint-Pierre de Vouvray, dont la portée est 131,80 m, les Compagnies de Chemin de Fer hésitaient encore à utiliser le béton armé dans la construction des grands

ponts-rails. Celui de Landelies, exécuté en 1921, a constitué, à l'époque, un ouvrage d'une grande hardiesse par sa portée, 64 mètres, et son surbaissement, 1/10, par les surcharges imposées, 40 % de plus que celles du règlement ministériel français de janvier 1915, par les fatigues admises à la compression du béton, 60 kg/cm² à l'intrados, 167 kg en moyenne dans les sections rétrécies des articulations.

Or, comment a-t-on constitué les bétons de cet ouvrage si audacieusement, on aurait volontiers dit, à l'époque, si dangereusement chargé ? Voici ce qu'écrivait, à ce sujet, dans « Les Annales des Ponts et Chaussées » de 1923, M. l'ingénieur Freyssinet qui avait conçu l'ouvrage et qui avait été chargé d'en diriger l'exécution par l'entrepreneur, la Firme Limousin & C°.

« Le dosage employé pour l'exécution des arcs est de 350 kg de ciment par mètre cube de béton fini. Pour les maçonneries des culées, qui ne contenaient pas d'armatures, ce dosage a été réduit à 200 kg avec augmentation progressive au voisinage des articulations. Les masses d'articulations, armées transversalement, sont au dosage de 800 kg par mètre cube de béton.

» Pour obtenir le béton, on n'ajoutait au ciment que le résidu, exempt de tout criblage, du concassage du déblai rocheux de l'ouvrage et de ses abords après enlèvement du ballast. Ce produit de concassage de roches calcaires avait un aspect terreux peu engagé et la décision n'a été prise qu'après de très nombreux essais portant, soit sur des produits de criblage du tout venant, mélangés pour obtenir des compositions granulométriques variées, soit sur des sables et graviers des origines les plus diverses. Les résistances les plus élevées ont été toujours et constamment obtenues avec le tout venant non criblé, tel qu'il sort du concasseur. »

La construction du pont Candelier n'eut aucun retentissement en Belgique. Il ne semble pas que l'innovation audacieuse, consistant à fabriquer au moyen de calcaire concassé tout venant du béton destiné à être sollicité de la manière la plus défavorable, ait été remarquée par les ingénieurs belges. Elle ne fut pas invoquée par les producteurs de concassés calcaires dans la défense de leurs produits. Mais ceci s'explique aisément : aucune carrière n'avait été appelée à fournir de la pierrière puisqu'on n'avait utilisé rien d'autre que du calcaire extrait des fouilles.

Si M. Freyssinet n'a pas hésité à réaliser en béton de calcaire son audacieux projet de pont c'est sans doute parce que, en France, ce matériau, très abondant, est couramment employé. Mais il est certain que si le pont de Landelies avait dû être construit, par un entrepreneur belge, pour une administration belge, en 1921, et même bien plus tard, on ne se serait pas arrêté un seul instant à l'idée d'utiliser le calcaire. D'ailleurs, lorsque l'ouvrage fut reconstruit, pendant la guerre, par la Société Nationale des Chemins de Fer Belges, qui avait

succédé à la Compagnie du Nord Belge, le calcaire ne fut pas employé, quoiqu'il y eut alors, à proximité immédiate de l'ouvrage, deux carrières de calcaire produisant des concassés. Les voûtes sont en béton de porphyre. On n'est pas allé cependant jusqu'à démolir entièrement les culées. Les massifs qui supportent les poussées des voûtes ont été conservés et sont toujours, faut-il le dire, en parfait état. Les voûtes, par contre, présentent déjà des déteriorations dues, incontestablement, à un enrobage insuffisant des armatures, mais non à la qualité du béton.

Les premiers règlements d'après la guerre 1914-1918 relatifs aux ouvrages en béton armé, s'ils n'ont pas explicitement exclus le calcaire, n'en n'ont, en tout cas, pas préconisé l'emploi.

Ainsi, le premier règlement du Ministère des Travaux Publics de 1923 (circulaire n° 298 de l'Administration des Ponts et Chaussées pour les constructions en béton armé) donne la composition d'un béton type dont l'emploi n'est pas strictement imposé mais que les entrepreneurs ont généralement adopté pour éviter de devoir faire la preuve que d'autres bétons étaient de qualité convenable.

Dans la composition de ce béton type ne pouvaient entrer que la pierrière et le poussier de porphyre ou le gravier et le sable du Rhin. Cette circulaire a contribué à accréditer l'idée que le porphyre et le gravier du Rhin étaient supérieurs aux autres matériaux pierreux.

A la même époque, l'Association Belge de Standardisation entreprenait l'élaboration d'instructions relatives aux ouvrages en béton armé qu'elle publiait par éditions successives, dès 1923. Ces instructions ne prescrivent ni ne recommandent l'une ou l'autre nature de pierre, mais on peut se faire une idée de l'esprit dans lequel elles sont établies en lisant l'ouvrage « Pratique du calcul du béton armé » (Edition 1931) du Professeur Magnel, qui prit une part prépondérante dans la rédaction des règlement édités par l'Association. Aux pages 286 et 287, Magnel écrit :

« Les pierailles et graviers se composent ou bien d'éléments roulés ou de pierres ou laitiers concassés.

» En Belgique, le gravier de Meuse et celui du Rhin conviennent également bien pour faire des bétons. Toutefois, le gravier de Meuse est parfois impropre (1) et dans ce cas, il faut le laver.

» Toutes les pierres dures, non gélives, concassées, conviennent pour le béton ; on évitera les pierres calcaires si l'on veut un béton ayant le maximum de résistance au feu. »

Et l'auteur fait suivre ce texte d'un tableau des caractéristiques (poids, vides, modules de finesse) de certains graviers et pierailles :

(1) « Impropres » évidemment dans le sens de « sale ».

le gravier du Rhin, le gravier roulé de Meuse, le gravier concassé de Meuse, les plaquettes 5/20 de porphyre, le laitier 5/20.

On ne peut dire que ces textes, qui ont servi de guide à de nombreux ingénieurs, mettent en vedette le grès, le quartzite, le calcaire.

Et pourtant, dans un climat peu favorable, le béton de calcaire a enregistré des succès importants dans les années 1930 à 1940, dans les régions de Tournai et de Charleroi où il existait, — elles existent encore — des carrières équipées pour la production de pierrière et de poussier.

Pour les travaux à la Sambre, les Carrières de calcaire de Landelies ayant fait des offres avantageuses aux entrepreneurs, leurs pierrières ayant donné toute satisfaction aux essais de résistance à la compression, le béton du pont Candelier ne présentant aucune trace de détérioration, alors qu'il avait subi, notamment, les froids exceptionnels de février 1929, le calcaire fut employé dans la construction de murs d'eau, du mur de quai du siège n° 19 des Charbonnages de Monceau-Fontaine (1) et des ponts en béton armé franchissant la Sambre à Charleroi. Lorsqu'il s'agit, en 1940, d'achever la démolition de ces ouvrages, mis hors service par faits de guerre, le béton se montra particulièrement résistant à l'action des marteaux-pics. L'entrepreneur crut que l'on avait employé un béton de composition spéciale, et en demanda la composition. Il fut tout étonné d'apprendre que ce béton ne présentait d'autre particularité que d'être fabriqué avec de la pierrière en calcaire viséen, gris clair, de Landelies.

Quant au quai du siège 19, à en juger par son aspect, on peut lui attribuer une existence indéfinie.

Dans le Tournaisis on peut voir de nombreux ouvrages en béton de calcaire et parmi eux, ceux cités ci-après, qui datent d'une trentaine d'années et qui ont résisté victorieusement aux intempéries au cours de cette période :

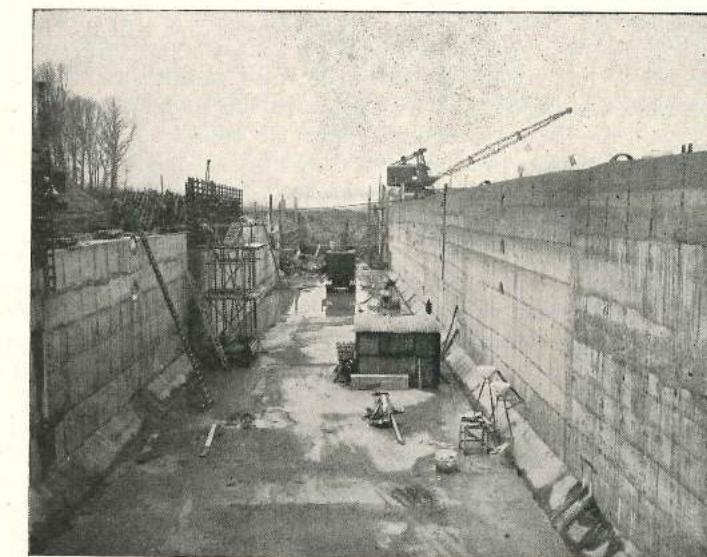
1^o aux nouvelles usines des Carrières et Ciments Bataille, la charpente entière, une cheminée de 60 m de hauteur en blocs de béton armé, les traverses en béton armé d'une voie de raccordement au chemin de fer et une estacade supportant cette voie ;

2^o aux usines de la S.A. des Ciments Portland de l'Escaut, des silos à ciment ou à clinker, les piliers supportant la passerelle de transport des pierres, la passerelle supportant une grosse conduite de vapeur, un auvent en porte à faux au-dessus du quai d'embarquement sur l'Escaut.

Diverses constructions plus récentes ou de date indéterminée, peuvent encore être citées, notamment des silos, un mur de quai, un support de charpente en béton armé de pont roulant, des pilotis d'un

pont sur l'Escaut, le tout aux Cimenteries Delwart, des parties de bâtiments importants à Tournai (Collège Notre-Dame, Etablissements R. Pollet, Grande Blanchisserie Tournaisienne, Grand Bazar Parisien, Banque Jules Joire), à Estaimbourg (Tannerie Masure Dalhuin), dans les Carrières de Seilles, Marche-les-Dames, Namèche, Comblain (supports de fours à chaux et d'autres ouvrages), à Péronnes (construction d'une écluse du Canal de Nimy à l'Escaut [ci-dessous]) ; et l'on peut mentionner encore le Viaduc de Conque et divers ponts dont ceux de Recogne, Mirwart, Grupont ...

Dans les pays étrangers qui disposent de gisements de calcaires, notamment en Angleterre, en Allemagne, en France, les bétons de calcaire sont fort appréciés. Et pourtant, le calcaire n'y est pas toujours très dur. C'est ainsi qu'à Marseille, dans des bâtiments ou autres ouvrages importants comme la Gare Maritime de la Joliette, les jetées



en Méditerranée, le Stade Vélodrome, la Bourse du Travail, la Faculté des Sciences, l'Ecole Supérieure Michelet, le Solarium du Roucas Blanc, les Eglises du Sacré-Cœur et du Rouet, on a employé du béton fabriqué avec du calcaire en provenance de carrières situées dans la région, à Saint-Tronc, et dont la résistance à la compression est 1850 K/cm², plutôt inférieure, par conséquent, à celle de nos calcaires dévoniens, viséens ou du Tournaisis.

Ainsi est-il établi que des firmes importantes, de nombreux ingénieurs et architectes ont fait confiance au calcaire ; ils n'ont pas eu à le regretter.

(1) Avec la même composition de béton que celui des culées du pont Candelier.

En mai 1939, à la requête de la Chambre de Commerce et d'Industrie du Tournaisis, l'Administration des Voies Hydrauliques consentit à mettre sur le même pied, pour la fabrication des bétons mis en œuvre dans les travaux dépendant de cette Administration, et sous-traités à l'action du gel et des eaux agressives, le calcaire et les autres matériaux employés jusqu'alors. Cette décision, qui présentait un grand intérêt pour les carrières de calcaire puisqu'elle leur donnait la possibilité de faire des fournitures aux entrepreneurs chargés de travaux comportant des cubes considérables de béton, resta, en fait, lettre morte pendant comme après la guerre.

Le Béton de calcaire après la guerre.

En ces dernières années, l'Institut Belge de Normalisation, qui a succédé à l'Association Belge de Standardisation, a revu les instructions relatives aux ouvrages en béton armé, avec le concours, notamment, de représentants des Départements ministériels intéressés dans la construction, de la Société Nationale des Chemins de Fer Belges, de la Chambre des Ingénieurs-Conseils, du Bureau SECO, de la Fédération Royale des Sociétés d'Architectes de Belgique, si bien que la cinquième et dernière édition des Instructions, la norme NBN.15, publiée en juin 1955, peut être considérée comme le règlement belge des constructions en béton armé.

Les prescriptions relatives aux pierrailles, graviers, sables et poussiers sont fort sommaires. L'article 20 est relatif à la désignation des matériaux inertes : gros granulats dont la nature n'est pas précisée, sable de rivière, sable de carrière, sables provenant du concassage de roches naturelles ou artificielles, sables provenant du broyage de laitier granulé.

L'article 21 stipule que, sauf cas exceptionnels, à justifier chaque fois, les matériaux doivent avoir une dureté comparable à celle du porphyre ou du grès dur. L'article 22 traite de la propreté des matériaux et l'article 23 de la forme des grains.

L'article 21 n'est pas très précis ; il n'y a pas une dureté du porphyre ou du grès. On sait, qu'au contraire, il y a des grès et des porphyres de duretés très différentes et il en est de même pour le calcaire. Celui-ci ne semble pas exclu, puisqu'il en est de plus durs que certains porphyres et certains grès, et que l'article 21 ne jette pas l'interdit sur la pierre gélive. Il n'est pas prescrit que les pierrailles doivent satisfaire à un essai de compression statique et aucun autre essai de dureté n'est imposé. Il semble donc que l'on s'en tienne au contrôle du béton, c'est-à-dire à l'obligation pour celui-ci de satisfaire à l'essai de résistance à la compression.

Les prescriptions établies par le Ministère des Travaux Publics sont plus explicites. Dans le nouveau Cahier Général des Charges,

fascicule II, 3^e Edition (1955), l'article 216 stipule :

« Les pierres concassées (pierrailles ou grenailles) proviennent du concassage de roches saines dures et non schisteuses de porphyre, quartzite, grès, calcaire, de blocs de laitier basique de haut fourneau, de galets ou graviers de rivière ou de carrière. Elles sont triées mécaniquement. »

Ce texte donnerait toute satisfaction s'il n'était pas suivi de celui-ci, qui constitue le 5^e alinéa du même article 216 :

« Le calcaire n'est pas gélif, c'est-à-dire que sous l'action répétée du gel, il ne présente pas de détériorations telles que l'altération des arêtes ou la fissuration par éclats qui sont les manifestations d'une désorganisation intérieure qu'on ne peut attribuer à d'autres causes que le gel. »

Quant à l'Administration des Routes, dans son Cahier Général des Charges n° 252 de 1953, elle a aussi admis pour les revêtements de routes en béton de ciment les pierrailles de même nature avec la même restriction relative à la gélivité (chapitres IV et VII).

La prescription relative à la gélivité peut s'expliquer par le fait que les Cahiers Généraux des Charges doivent prévoir tous les cas possibles d'emploi des pierrailles et pas seulement leur incorporation dans le béton. Si l'on veut bien admettre, la question sera examinée ci-après, que cette incorporation fait perdre à la pierraille calcaire toute gélivité, on fait tomber toute restriction à l'emploi de la pierraille calcaire dans les bétons.

Et pourtant, chez certains utilisateurs, subsiste une prévention contre l'emploi du calcaire dans les bétons.

Les critiques et leur réfutation.

Que reproche-t-on, en somme, au béton de calcaire ? Il serait gélif et moins dur que le béton de porphyre, de quartzite, de grès, de gravier de rivière. Il résisterait mal au feu. Quant aux revêtements de route en béton de calcaire, ils seraient plus glissants et s'useraient plus vite que les autres.

Le reproche de gélivité n'est qu'une affirmation gratuite. Les ouvrages en béton de calcaire, cités précédemment, et âgés d'une trentaine d'années et plus ne présentent pas de dégradations qu'on puisse imputer aux intempéries, à la gelée. On a constaté, au cours de démolition d'ouvrages, la solidité de tels bétons. On peut voir encore, aux abords du pont Candelier à Landelies, des fragments de béton provenant de la démolition de l'ouvrage en 1940 et juger de leur bonne tenue aux intempéries auxquelles ils sont exposés, par toutes leurs faces, depuis plus de quinze ans.

Et cela n'a rien d'étonnant. Le béton est, en somme, une maçon-

nerie « opus incertum » à petits éléments. Une maçonnerie de ce genre, en moellons de calcaire, bien faite, bien rejointoyée, défie les années, voire les siècles, beaucoup mieux, en tout cas, que les pierres exposées à l'air par plusieurs faces (pierres en saillie, corniches, etc.). Or, les pierrailles du béton, qui apparaissent en parement, n'ont qu'une seule de leurs faces exposée à l'air ; elles sont solidement en- chassées dans une gangue de mortier ; elles ont perdu, par le concas- sage, leurs limés et autres plans de moindre résistance, si bien qu'une telle maçonnerie doit être plus apte encore qu'une maçonnerie de moellons à résister aux injures du temps.

La résistance à la compression d'un béton ne dépend pas seulement de celle de la pierraille. La dureté du mortier joue un rôle en cette affaire, ainsi que l'adhérence entre pierraille et mortier qui paraît particulièrement élevée quand cette pierraille est du calcaire. On constate, en effet, que le revêtement en mortier de ciment des galeries souterraines adhère particulièrement bien, quand la paroi de ces galeries est constituée par de la roche calcaire ; l'adhérence est moins bonne sur roche feldspathique ou siliceuse ; sur roche micacée, le mortier ne semble se maintenir que par son accrochage aux aspérités.

C'est en vue d'élucider la question de la dureté des bétons de calcaire et de son évolution sous l'influence des intempéries que vers 1940, des carrières du Tournaisis ont chargé M. Dutron, Directeur du Laboratoire de Recherches et de Contrôle du Groupement des Fabriques de Ciment Portland, d'une étude de cette question.

C'est dans le 2^e fascicule de 1941 des Annales des Travaux Publics de Belgique que M. Dutron a publié les résultats de ses recherches sous le titre : Une pierre gélive convient-elle comme pierre à béton ? S'ils n'ont pas eu, dans les milieux d'Ingénieurs, d'Architectes, de Constructeurs, à l'époque de leur publication, le retentissement qu'ils méritent, il n'est pas trop tard pour attirer l'attention sur le très grand intérêt qu'ils présentent. M. Dutron a procédé par comparaison du comportement au gel de bétons qui ne diffèrent que par la pierraille, d'une part le porphyre, de l'autre ce calcaire siliceux et alumineux du Tournaisis employé à la fabrication de la chaux hydraulique et qui, dans la gamme des calcaires primaires est parmi les plus durs mais aussi parmi les moins résistants aux intempéries.

Après avoir rappelé que le calcaire du Tournaisis a tendance à s'exfolier et à manifester de la fissibilité, notamment sous l'effet de la gelée, M. Dutron signale que ce calcaire, essayé sur cubes de 5 cm de côté, a donné des résistances à la compression variant de 1700 à 2380 kg/cm² (moyenne 2180) tandis que le porphyre peut atteindre, à quelques exceptions près, 2000 à 3600 kg/cm² (moyenne 2800) c'est- à-dire environ 30 % de plus que le calcaire.

M. Dutron donne ensuite les résultats de ses essais sur du béton

dont le dosage est 840 litres de pierraille, porphyre ou calcaire, 420 litres de sable du Rhin, 350 kg de ciment Portland à haute résistance. Le rapport de la résistance à la compression du béton de calcaire à celle du béton de porphyre est 0,904 sur cubes de 250 cm² de face, 0,946 sur prismes de 250 cm² de section et 47,5 cm de hauteur. Quant au rapport des résistances à la traction, il est 0,845, à la flexion 0,908, les mesures étant faites sur éprouvettes de 1 m de longueur et de 100 cm² de section. Ces résultats se rapportent à des éprouvettes ayant 28 jours d'âge. Ils sont respectivement 0,872, 0,938, 1,048 et 1,015 sur éprouvettes âgées de 3 mois.

Sur des cubes sciés de 0,10 m de côté, dosage 900 litres de pier- raille 5/50, 400 litres de sable du Rhin, 300 kg de ciment Portland à haute résistance, le rapport des résistances à la compression a été 0,987, 0,868, 0,948 respectivement à 4 1/2 mois, 8 1/2 mois et 12 mois ; sur prismes 10 x 10 x 30 cm et à 12 mois, ce rapport a été 1,043.

Ainsi, en compression, le rapport des résistances a évolué autour de 0,9 tandis qu'en traction et flexion il semble avoir été voisin de 1 au bout de trois mois.

M. Dutron en vient ensuite aux essais de résistance au gel. Il apprécie celle-ci par la mesure de la résistance à la compression avant et après une série de 15 puis de 30 gels et dégels successifs, chaque opération de gel et de dégel étant faite dans les conditions normales entre — 15° et + 15 à 20° C. Afin que le béton assyé contienne autant de pierraille que possible et de gros éléments, le dosage est 900 litres de pierraille 5/50, 400 litres de sable du Rhin, 300 kg de ciment Port- land à haute résistance.

La gélivité de la pierre calcaire incorporée dans le béton ne peut être mise en doute, car, outre des altérations apparentes, des cubes de pierre accusaient après 30 gels et dégels successifs une perte de résistance de 20 à 30 %. Quant au béton de calcaire, sa perte de résistance a été en moyenne 5 % après gels et dégels répétés 15 et 30 fois, mesurée sur cubes de 0,10 m de côté dont les faces n'avaient subi aucune préparation à la sortie des moules.

Sur cubes dont les faces avaient été lavées et frottées à la brosse métallique avant leur prise complète, de manière à faire mieux appa- raître la pierraille, la perte de résistance a été nulle. Elle a été de 2 % en moyenne sur cubes à faces sciées donc à pierrailles très appa- rentes. Quant aux cubes en béton de porphyre, ils ont accusé, après les gels et dégels, une augmentation de résistance de 7 % ; certaines éprouvettes en béton de calcaire ont d'ailleurs accusé aussi une augmentation de résistance après les gels.

Il est à noter, enfin, que la pierraille de calcaire provenant du concassage de pierres fraîchement extraites de la carrière et celle qui pierraille ou de gravier dans la construction de ces ouvrages qui sont

provient du concassage de pierres exposées depuis des années aux intempéries, se sont comportées sensiblement de la même manière aux essais.

Et M. Dutron de conclure, de cette série d'essais, « que la gélivité de la pierraille ne rend pratiquement pas gélif le béton dans la composition duquel elle entre, du moins dans les conditions d'exécution de ces essais ». Ces conditions, faut-il le dire, sont d'une extrême sévérité : les bétons éprouvés sont de petits cubes de 10 cm de côté et contiennent une proportion très élevée, 59 %, de pierraille en éléments pouvant atteindre 5 cm.

M. Dutron a enfin procédé à des gels plus sévères encore par le nombre de leur répétition, jusqu'à 60 et 100. Ses conclusions restent les mêmes. « Compte tenu, » dit-il, « de la dispersion des résultats et du nombre d'éprouvettes relativement restreint, les deux bétons se sont comportés d'une manière sensiblement équivalente aux épreuves de gélivité ».

Parmi d'autres résultats d'essais sur bétons de calcaire, on citera ceux qui ont été effectués également par le Laboratoire de Recherches et de Contrôle du Groupement Professionnel des Fabricants de Ciments Portland en 1956 et qui sont intéressants parce qu'ils constituent, comme ceux qui ont été cités ci-avant, une comparaison entre deux bétons qui ne diffèrent que par la nature de la pierraille, porphyre et calcaire du Tournaisis. La composition du béton était la suivante : 900 litres de pierraille 8/22, 450 litres de sable du Rhin, 350 kg de ciment Portland à haute résistance et 166 litres d'eau.

Le rendement n'a pas été tout à fait le même pour le béton de calcaire et le béton de porphyre ; le premier contenait 360 kg de ciment par mètre cube mis en place et le second 348 kg. Quant aux résistances à la flexion et à la compression exprimées en kg/cm² elles figurent dans le tableau suivant (extrait du P.V. n° 30.930 du Laboratoire).

Age	Numéros des éprouvettes	CALCAIRE		PORPHYRE	
		Flexion	Compression sur demi-flexions	Flexion	Compression sur demi-flexions
28 jours	1	85,00	492 480	72,00	462 457
	2	80,00	498 478	71,80	451 476
	3	81,60	478 496	75,20	505 508
	moyenne	<u>82,20</u>	<u>487</u>	<u>73,00</u>	<u>476,50</u>
56 jours	1	85,00	569 554	83,20	577 579
	2	87,80	569 569	81,50	577 554
	3	89,80	569 569	86,40	554 542
	moyenne	<u>87,50</u>	<u>566,50</u>	<u>83,70</u>	<u>563,80</u>

Dans les bétons dont il a été question ci-avant, il a été fait usage de sable siliceux. La substitution de poussier de calcaire à ce sable a agi dans un sens favorable sur la résistance de bétons de route exécutés en Italie, comme en témoignent les résultats d'essais reproduits ci-après et qui figurent dans une Communication faite par l'ingénieur Mario de Pra' au Congrès International de la Route en Ciment qui s'est tenu à Rome en octobre 1957.

Dosage en ciment		250 kg/m ³							
Additions chimiques		—		a		a+f		—	
Matériaux inertes		p	p+c	p	p+c	p	p+c	p	p+c
Courbe granulométrique	% d'impalpables	4	3,6	3	2,8	3	2,8	4,5	4,4
	module de finesse	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	6,1	6,1
Rapport ciment eau		0,60	0,55	0,56	0,53	0,52	0,48	0,61	0,55
Résistance à la compression en kg/cm ²		182	223	189	235	243	271	184	241

La lettre p. se rapporte aux bétons dans lesquels tous les éléments inertes sont constitués par du porphyre, et les lettres p + c à ceux dont les éléments inertes sont constitués par du porphyre et du calcaire, celui-ci étant sous forme de sable passant au tamis dont les jours ont 4,76 mm de côté en quantité égale à 25 % du poids des matières inertes. On peut constater que la substitution du calcaire au porphyre augmente la résistance à la compression de 12 à 31 %.

Ainsi, les études et essais en laboratoire autant que l'expérience acquise permettent de conclure que le béton de calcaire est solide et durable. Mais peut-être entendra-t-on encore l'objection suivante : ce qui est vrai pour le calcaire du Tournaisis, l'est-il pour les autres calcaires, tant en ce qui concerne la résistance à la compression que la permanence de celle-ci dans le temps ?

Le petit granit, le calcaire dévonien, ou viséen ou même jurassique, pour autant qu'il s'agisse de pierre saine, normalement dure, non schisteuse, résistent au moins aussi bien, et généralement beaucoup mieux que les pierres du Tournaisis aux intempéries, aux

gelées. Mais la pierre de Tournai étant parmi les calcaires les plus résistants à la compression, les bétons « dévoniens » ou « viséens » pourraient être en moyenne moins durs que le béton « tournaisien ». Celui-ci a dépassé nettement, en compression, dans les essais de M. Dutron, 300 kg/cm² (sur cubes âgés de 28 jours). Si la résistance des autres descendait à 300, ou même, ce qui paraît très peu probable, à 275 kg, elle serait encore plus que suffisante pour que les ouvrages en béton armé de calcaire, puissent être calculés avec les mêmes tensions de sécurité, et par conséquent, aient les mêmes dimensions que ceux qui sont construits en béton de porphyre, grès, gravier. Car, si l'on se réfère à la norme NBN.15 ces tensions de sécurité sont une fraction de la résistance à la rupture du béton fixé par la norme, indépendamment de la nature de la pierrailler, à 190 kg/cm² pour un béton à 350 kg de ciment Portland à haute résistance, peu différent de celui dont s'est servi M. Dutron dans ses essais.

Avec une résistance probable supérieure à 275 kg/cm², le béton de calcaire, quelle que soit la nature du calcaire, satisfait donc certainement à la norme NBN.15.

Et ce qui est si largement vrai pour le béton à 350 kg de ciment Portland à haute résistance ne peut pas ne pas l'être aussi pour les autres compositions en ciment normal ou à durcissement rapide indiquées dans la norme. Il faut ajouter ici que la présupposition de la norme en ce qui concerne la résistance à la rupture n'est applicable que si l'âge de la mise en service de l'ouvrage est de 28 jours au moins, si les matériaux du béton sont d'usage courant et bien connu et si la fluidité est normale (les limites sont indiquées dans la norme); mais ce sont là des conditions qui sont généralement satisfaites.

En vue d'alléger les ouvrages en béton armé, l'entrepreneur peut tabler, dans les calculs, sur une résistance à la rupture, par compression, supérieure à ce qui vient d'être indiqué, pour autant, bien entendu, que le béton qu'il met en œuvre atteigne réellement la résistance présupposée et que celle-ci n'excède pas 350 kg/cm². Ce taux est loin d'être au delà des possibilités du béton de calcaire ; c'est affaire de dosage et de soins dans la fabrication. A ces 350 kg correspondent un taux de travail maximum permis de 70 kg/cm². Rappelons qu'au pont Candelier, M. Freyssinet n'hésitait pas à faire travailler le béton de calcaire des voûtes du pont jusqu'à 60 kg/cm² et cela à une époque (1921) où la résistance des mortiers de ciment à 28 jours était bien inférieure à ce qu'elle est aujourd'hui.

Dans les ouvrages en béton non armé, exception faite des revêtements routiers, le béton ne travaille généralement qu'à des taux très faibles. Il s'agit souvent d'ouvrages massifs tels que murs de soutènement, murs de quai, piles et culées de pont, ouvrages en rivière dont les écluses et barrages, travaux à la mer. Le béton de calcaire convient évidemment aussi bien que n'importe quel autre béton de

fort intéressants pour les producteurs de pierrailles à raison de l'importance des volumes de béton qui y entrent.

Que faut-il penser de l'interdiction d'emploi (énoncée dans de nombreux cahiers des charges) des bétons de calcaire, dans les constructions où il y a risque d'incendie ?

On sait que, sous la pression atmosphérique, le calcaire commence à se décomposer dès que sa température atteint 900° C. Il ne peut donc être question d'exposer à une température aussi élevée un béton de calcaire.

Mais bien avant d'atteindre 900° C, tout autre béton subit de graves dommages. Le Comité britannique pour la prévention des incendies constatait, après des expériences faites en 1906, 1917, 1919 que les bétons de pierres calcaires et de laitier basique de haut fourneau résistent mieux au feu que ceux dont les granulats sont quartzifères. Le journal « Rock Products » du 16 octobre 1926 reproduisait des conclusions d'essais faits en Allemagne par le Dr Kurt Endel sur divers matériaux pour béton et notamment celle-ci :

« Le résultat pratique de ces recherches est que, pour les constructions devant résister au feu, il faut rejeter les mélanges contenant du quartz et employer des agrégats composés de laitier, de basalte ou de pierres calcaires, étant donné l'expansion lente et uniforme de ces matières. »

Et que devient aux hautes températures, mais inférieures encore à 900° C, le ciment hydraté ? (Ciment Portland ou métallurgique, mais non le ciment réfractaire comme le ciment fondu). Il perd son eau de cristallisation et tend à retourner à l'état de poudre.

Quant aux poutres en béton armé ou précontraint, elles perdent toute résistance à la flexion, par allongement des armatures, à des températures inférieures à 700° C suivant des essais, effectués par la Commission Néerlandaise C.U.R., et faisant l'objet de son Rapport n° 13 de janvier 1958.

Il résulte de ce qui précède que les bétons, armés ou non armés, (sauf ceux qui sont constitués de granulats réfractaires et de ciment alumineux) perdent toute résistance dès qu'ils sont exposés à des températures élevées, mais nettement inférieures à la température de décomposition du calcaire en chaux et anhydrite carbonique. Il n'y a donc aucune raison de proscrire l'emploi des bétons de calcaire dans les constructions exposées aux incendies. Il semble, au contraire, qu'ils devraient figurer parmi ceux auxquels il y a lieu d'accorder la préférence.

Dans un autre vaste champ d'application des bétons, celui des revêtements de route, l'emploi du béton de calcaire suscite de vives critiques : les routes en béton de calcaire s'useraient plus vite et seraient plus glissantes que les autres.

Que le calcaire s'use plus vite que le porphyre ou le grès par frottement, c'est un fait incontestable. Dans son mémoire, mentionné précédemment, M. Dutron donne à ce sujet d'intéressantes précisions :

« La résistance de la pierre calcaire à l'usure », dit-il, (rappelons qu'il s'agit de la pierre du Tournaisis) « est 3 à 5 fois moins élevée que celle du porphyre et 1,5 à 2,5 fois moins élevée que celle du grès. » La différence de résistance à l'usure est beaucoup moins marquée pour les bétons composés de ces pierrailles, le mortier intervenant dans la résistance à l'usure, notamment s'il est à sable siliceux. » L'usure du béton de calcaire n'est plus que 1,75 à 2,50 fois plus grande que celle du béton de porphyre et que 1,25 à 2,50 fois plus élevée que celle du béton de grès. »

Ainsi se confirme, en ce qui concerne la résistance à l'usure, ce qui a déjà été signalé à propos de la résistance à la compression, c'est-à-dire que les différences des caractéristiques physiques des diverses pierrailles sont fortement atténuées par leur incorporation dans le béton.

Mais il n'en reste pas moins que le béton de calcaire s'use plus vite que le béton de porphyre ou de grès et qu'on pourrait avoir tendance à renoncer à l'emploi de la pierraille de calcaire dans les revêtements de routes en béton si l'on constatait qu'ils périssent effectivement par usure, par amincissement excessif des dalles. Mais leur réduction d'épaisseur, même sous trafic lourd et intense, est faible et ce n'est pas cela qui préoccupe les constructeurs de routes. Leurs grands soucis viennent notamment des tassements irréguliers de l'assiette, générateurs de crevasses, des dilatations et contractions des dalles sous l'effet des variations de température, du coincement, voire du soulèvement des dalles, par temps chaud, de l'élargissement des joints et crevasses en hiver, favorisant la pénétration des eaux de pluie dans la fondation malgré l'espèce de calfatage au bitume, onéreux et imparfaitement efficace des joints et crevasses.

La réputation que l'on a tenté de faire aux routes en béton de calcaire d'être plus glissantes que les autres est-elle justifiée ? C'est là un défaut inhérent à toutes les routes en béton que de devenir lisses et plus ou moins glissantes à l'usage. Le mortier tend à se polir ainsi que les pierrailles, quelle qu'en soit la nature. Ne voit-on pas, dans d'anciens pavages, des pavés de grès qui ont pris un beau poli, et lorsqu'on construisait les chaussées en gros pavés, n'interdisait-on pas l'emploi de pavés en porphyre au profit du grès dans les rampes un peu fortes ?

Certes, le calcaire est particulièrement apte à prendre le poli ; tous les marbres belges sont des calcaires. Mais les différences de « glissance » des diverses pierrailles s'atténuent certainement lorsqu'elles sont encastrées dans le mortier. Il serait malaisé de dire jusqu'à quel point cette atténuation se produit ou plutôt il est préma-

turé de prendre position à ce sujet. La question est examinée avec beaucoup d'attention. On a construit des appareils mesurant la « glissance » ; sans doute fourniront-ils des indications intéressantes. Mais une autre manière d'élucider les problèmes de « glissance » ne devra pas être négligée, c'est l'étude statistique des accidents causés par les dérapages sur différents types de revêtement en béton. Il faudra donc qu'il existe, dans différentes régions du pays, suffisamment de tronçons de route en béton de calcaire pour que, des observations faites, on puisse tirer des conclusions valables.

Une autre tendance semble se faire jour dans la technique de la lutte contre la glissance. On fait remarquer que dans la mince couche superficielle des dalles, sujette à usure, il y a fort peu de pierraille mais surtout du mortier qui a reflué vers le haut au cours du damage. Dans ces conditions, ce ne serait pas la nature des pierrailles mais celle des sables et poussiers qui importeraient au point de vue de la glissance ; la meilleure pierraille serait alors celle qui donne aux dalles la plus forte résistance à la compression et à la flexion.

Que reste-t-il des critiques faites au béton de calcaire ?

Il paraît certain que le reproche de gélivité est tout à fait sans fondement.

Quant à cette opinion suivant laquelle on ne peut faire qu'un béton médiocre avec cette pierre tendre que serait le calcaire, elle n'est pas plus fondée. Le calcaire employé dans la fabrication des bétons est une pierre dure qui n'est pas inférieure, en tant que matériau constitutif du béton, au porphyre, au quartzite, au grès, au gravier de rivière.

L'usure des chaussées en béton est suffisamment faible, pour que l'on puisse employer indifféremment dans les bétons pour routes le porphyre, le grès, le calcaire, le laitier, le gravier concassé.

Les routes en béton ont tendance à devenir glissantes à l'usage. Les moyens de créer et de maintenir une bonne rugosité superficielle sont à l'étude.

L'adhérence du calcaire aux ciments.

On a constaté qu'avec certains poussiers et pierrailles de duretés assez différentes (30 % d'écart) on obtenait des bétons ayant à peu près la même dureté. On a constaté aussi que la rupture dans des bétons se fait souvent à travers les matériaux pierreux (appelés granulats dans la Norme NBN.329) (1) et non le long de leurs faces de contact avec le ciment. Des liaisons mécaniques naissent donc entre ciment et granulat au point qu'elles peuvent devenir plus fortes que la cohésion de ce dernier.

(1) Au lieu d'« agrégat » souvent employé mais à tort puisqu'un agrégat est un assemblage de parties qui adhèrent entre elles.

Quelle est l'origine de ces liaisons ? Les cristaux qui constituent la pâte de ciment hydraté enserrent les grains de sable et de pierrailles et s'accrochent à leurs rugosités. Indépendantes de la nature minéralogique des éléments pierreux, ces liaisons ont retenu l'attention de chercheurs comme Feret. Mais des liaisons d'autres genres peuvent prendre naissance : des attractions capillaires entre cristaux de granulat et cristaux de ciment hydraté s'ils sont séparés par un film liquide ou pâteux et des accollements maille à maille entre le réseau cristallin du ciment et celui du granulat.

Ces questions ont été étudiées par M. Farran, Ingénieur, Docteur ès Sciences physiques en un mémoire, publié dans la « Revue des Matériaux de Construction » numéros de juillet à septembre 1956, et qui présente un grand intérêt scientifique et pratique comme on va pouvoir en juger.

M. Farran, en utilisant les méthodes et techniques de la minéralogie, a procédé d'abord à l'examen microscopique de plaques minces (quelques centièmes de millimètre d'épaisseur) de différents mortiers au ciment Portland. Il a constaté l'existence de défauts de contact entre cristaux de ciment et grains de sable lorsque celui-ci provient du concassage de feldspathorthose, de quartz, de mica, de silex, d'anhydrite et a classé ces minéraux par adhérence décroissante dans l'ordre qui vient d'être indiqué. Mais lorsque le sable du mortier est constitué de grains de calcite ou de dolomite concassée, les plaques minces de mortier ne présentent plus aucun défaut de contact ; la calcite et la dolomite se distinguent, dit M. Farran, « très nettement des autres minéraux cités par leur adhérence exceptionnellement bonne ». Lorsqu'on remplace le ciment Portland par du ciment de laitier ou par du ciment sursulfaté, l'ordre d'adhérence décroissante des minéraux considérés reste le même mais il y a des défauts de contact même dans les mortiers à la calcite ou à la dolomite. Lorsqu'on se sert de sable roulé au lieu de sable de concassage, l'adhérence est moins bonne pour le quartz et mauvaise pour le feldspath ; mais l'excellente adhérence de la calcite et de la dolomite sur le ciment ne s'en trouve pas altérée. Les conditions de conservation du mortier (à l'air ou sous eau) ne modifient pas l'aspect des plaques de mortier à la calcite ou à la dolomite ; mais pour les autres minéraux, le durcissement à l'air paraît conduire à des défauts plus marqués que le durcissement sous eau (effet du retrait probablement).

M. Farran étudie ensuite la prise et le durcissement de pâtes de ciment notamment au contact du quartz, du feldspath, de la calcite. Celle-ci se comporte tout autrement que le feldspath et le quartz. Seuls les cristaux de calcite présentent des traces de corrosion au contact du ciment. Il y a donc une certaine dissolution de la surface des grains de calcite en contact avec une pâte de ciment au cours du durcissement. Et M. Farran de conclure : « Si les étroites liaisons

» dont on constate l'existence entre les ciments artificiels et la calcite » doivent sans doute être attribuées au développement d'accolements » épitaxiques (1), il n'en est pas moins vrai que ces derniers ne » peuvent apparaître qu'à la suite de la dissolution superficielle de » l'agréat au contact de la pâte de liant. Cette dissolution se révèle ainsi comme un facteur essentiel de l'adhérence finalement réalisée. »

M. Farran passe ensuite à l'étude quantitative de l'adhérence. Il compare les résistances à la traction de trois mortiers normaux (1:3) de ciment Portland. Dans le premier, le sable est du quartz pur concassé, dans le second du calcaire métamorphique à 98 % de calcite finement cristallisé, également concassé et dans le troisième le sable provient du concassage de gros cristaux de calcite. Les résultats obtenus figurent dans le tableau suivant :

	Résistance moyenne en kg/cm ²	
	à 7 jours	à 28 jours
Mortier au quartz	23,3	32,2
Mortier au calcaire	29,1	41,2
Mortier à la calcite	24,9	31,9

La différence de résistance des deux derniers mortiers dont les sables ont la même nature minéralogique paraît devoir être attribuée, dit M. Farran, « à la faiblesse de la cohésion des gros cristaux de calcite devant celle des grains polycristallins du calcaire métamorphique. Les résultats obtenus avec les mortiers au sable de calcaire métamorphique montrent bien l'intérêt mécanique que peut présenter l'utilisation, dans les bétons, de matériaux à base de calcite » lorsqu'ils sont suffisamment cohérents. »

Mais, dans les chiffres de résistance à la traction qui viennent d'être indiqués, intervient l'effet de rugosité des grains de sable. En vue de l'éliminer, M. Farran a fait des essais de collage de mortier sur des surfaces parfaitement polies de quartz et de calcite. Il a constaté que la calcite collait plus énergiquement que le quartz au mortier.

M. Farran n'a pas seulement étudié le comportement, au contact de divers minéraux, de ciments artificiels et de ciments métallurgiques mais aussi celui du ciment alumineux. Il a constaté que l'adhérence de ce ciment à la calcite paraissait plus énergique encore que celle des autres ciments.

(1) C'est-à-dire d'accolements par orientation mutuelle de cristaux d'espèces différentes.

M. Farran a opéré sur des cristaux et non sur des roches (sauf le calcaire métamorphique) analogues à celles que l'on utilise en Belgique dans la fabrication des bétons. Il serait fort intéressant d'étudier au point de vue de leur adhérence au ciment hydraté, nos matériaux d'usage courant : porphyre, quartzite, grès, calcaire. Comme les grès et quartzite sont constitués par des grains de quartz agglomérés, que les porphyres contiennent des feldspaths calcosodiques et des amphiboles ou biotite avec ou sans quartz, il est fort possible, vu les résultats obtenus par M. Farran, que de telles études aboutissent à des conclusions favorables au calcaire et permettent de donner l'explication de la dureté élevée des bétons de calcaire en général et en particulier celle de ce béton au concassé de calcaire tout venant (pierraille et poussier) dont M. Freyssinet disait, en 1923, qu'il avait donné « constamment et toujours » les résistances les plus élevées.

Le meilleur béton.

On a cru longtemps, mais c'était une erreur, qu'il fallait faire usage des granulats les plus durs pour obtenir les bétons les plus résistants. Lorsque, dans la suite, on a constaté que l'on pouvait obtenir des bétons tout aussi résistants avec des matériaux calcaires, on a pressenti que le calcaire ne devait pas se comporter au contact du ciment hydraté, comme une matière absolument inerte. Mais ce n'est qu'en ces dernières années que l'on a pu établir qu'il existait effectivement des liaisons très énergiques, de nature physico-chimique, entre les pâtes de ciment hydraté et le calcaire seulement (1), si bien que le béton de calcaire, plus que tout autre béton, tend à se comporter comme un matériau homogène, comme une roche artificielle.

On s'est aussi rendu compte que c'était une erreur de n'attribuer au béton de calcaire qu'une résistance aux intempéries, et notamment au gel, inférieure à celle des autres bétons.

Et il semble bien que l'on ait commis une autre erreur encore en proscrivant les granulats en calcaire des constructions susceptibles d'être exposées à de hautes températures, de l'ordre de 500° C.

Ainsi donc, les pierrailles et poussiers de calcaire, bien loin d'être de médiocres constituants des bétons, sont peut-être les meilleurs que l'on puisse employer et ce, quelle que soit la nature du ciment qui leur est associé : Portland, métallurgique ou alumineux.

A. CAULIER.
Inspecteur Général honoraire
des Ponts et Chaussées.

(1) La dolomie paraît se comporter comme le calcaire.

