

Étude du calcaire tournaisien de la carrière Cimescaut à Antoing (Belgique)

Analyse pétrographique et chimique et réactivité aux alcalins

Jeanne-Sylvine GUÉDON-DUBIED

Docteur en Géologie, ITPE
Section Géologie, Mécanique des Roches et Géotechnique de l'Environnement
Laboratoire central des Ponts et Chaussées

Gaël CADORET

Directeur de Cadoret Consulting
Paris

Vincent DURIEUX

Directeur du Service contrôle et développement production
Cimescaut Matériaux Antoing
Belgique

François MARTINEAU

Technicien supérieur
Section Géologie, Mécanique des roches et Géotechnique de l'environnement
Laboratoire central des Ponts et Chaussées

Pascal FASSEU

Chargé d'Études à la Cellule Études et recherches
Section béton et bâtiments
Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Lille

Vincent VAN OVERBEKE

Responsable production, Carrières d'Antoing
Belgique

RÉSUMÉ

Cet article analyse les potentialités d'emploi de la roche calcaire extraite dans la carrière Cimescaut à Antoing, (Belgique). L'étude a commencé par la qualification pétrographique et chimique des différents bancs exploités sur le site et la détermination de la réactivité potentielle aux alcalins par un essai normalisé (P 18-590).

Dans une deuxième phase, en vue d'optimiser l'utilisation de l'ensemble de la production de la carrière, des essais de performance sur formules de béton ont été réalisés en incorporant :

- dans une première série d'essais, la fraction gravillon Cimescaut + sable non réactif,
- dans une deuxième série d'essais, les fractions (gravillon + sable) Cimescaut,
- dans une troisième série d'essais, les fractions (gravillon + sable + fines) Cimescaut.

Dans cette dernière série, les fines utilisées sont issues du processus de broyage du calcaire tournaisien, sans traitement particulier. Ces fines pourraient être utilisées soit comme correcteur granulaire, soit comme addition pour béton hydraulique voire inhibiteur d'alcali-réaction. Une qualification précise du produit a été menée pour déterminer ses potentialités et les tester.

MOTS CLÉS : 36-32 - Calcaire - Norme - Alkali réaction - Microscope électronique à balayage - Essai - Emploi (util.) - Belgique - Pétrographie - Analyse chimique - Béton hydraulique - Analyse d'image - Fine (filler).

Introduction

Cette étude porte sur l'alcali-réactivité potentielle des cinq niveaux de calcaire tournaisien affleurant dans la carrière Cimescaut. La réactivité aux alcalins du calcaire tournaisien a été mise en évidence depuis de nombreuses années ainsi que ses principaux responsables minéralogiques. Cette détermination concernait le calcaire dans sa globalité, et non les niveaux pris séparément. Une étude fine, distinguant chacun des niveaux, est apparue nécessaire avant d'envisager une quelconque poursuite des essais. Cette première étape a visé à bien définir, pour les cinq niveaux à l'affleurement, les caractéristiques minéralogiques, chimiques et la réactivité en milieu alcalin, qualifiée par l'essai normalisé d'autoclavage P 18-590.

La deuxième phase a consisté à tester ce calcaire avec des teneurs croissantes en alcalins par l'intermédiaire de l'essai de performance, pour déterminer à partir de quelle valeur en alcalins la formule devenait réactive. Cette démarche devient de plus en plus courante, à l'heure actuelle, lorsque dans le cadre d'un chantier il n'est pas possible d'utiliser des granulats non réactifs pour un ouvrage classé en niveau de prévention C (pour des raisons d'éloignement de gisement NR*, par exemple). D'après le document « Recommandations pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction » : « dans le cas où l'appro-

visionnement en granulats NR serait particulièrement difficile, il pourra être utilisé des granulats reconnus potentiellement réactifs à condition de procéder à une étude approfondie de la formule envisagée, sur des bases expérimentales définies contractuellement ». Les conditions de convenance d'une formulation de béton s'appuient sur un essai de performance.

Lors du broyage de son calcaire tournaisien, la carrière Cimescaut produit des fines, dont la composition et les caractéristiques permettraient, peut-être, l'utilisation comme correcteur granulaire, ou comme inhibiteur d'alcali-réaction. Une qualification précise du produit a été menée pour déterminer ses potentialités. Cette démarche constitue la troisième phase de l'étude.

Dans tout le corps du texte les appellations NR correspondront à un matériau non réactif vis-à-vis de l'alcali-réaction, PR à un matériau potentiellement réactif.

Description du gisement

Contexte géologique

Une étude bibliographique a permis de reconstituer un log stratigraphique du calcaire de Tournai (âge tournaisien, Dinantien), soit environ 340 Ma (Dupuis et *al.*,

1993), en indiquant les niveaux à carboniaux, considérés comme des niveaux repères dans la série (fig. 1).

D'un point de vue sédimentologique et paléontologique, le calcaire de Tournai se divise en deux sous-ensembles contrastés, séparés par une discontinuité sédimentologique dite du « gras délit ».

L'ensemble inférieur consiste essentiellement en calcaires micritiques (micrite = contraction de l'anglais microcristalline calcite) imprégnés de silice « diagénétique ». Ils sont argileux à la base, pour passer vers le sommet à une sédimentation essentiellement calcaire (niveaux « Providence » et « Pont-à-Rieu »). Ces calcaires renferment toujours des bioclastes, en abondance variable (calcaires organo-clastiques). Ces restes d'organismes résultent de la dissociation sur place de crinoïdes, bryozoaires et brachiopodes auxquels s'ajoutent, à divers niveaux, des gastéropodes, bivalves, nautiloïdes, trilobites.

Le « gras délit » est une passée d'argilite, épaisse de quelques centimètres à près de 20 cm suivant les endroits, qui constitue un excellent niveau repère dans tout le gisement.

L'ensemble supérieur est constitué essentiellement de micrites souvent argileuses, imprégnées de silice diagénétique. Il existe de très nombreuses traces fossiles témoignant habituellement d'une profondeur d'eau

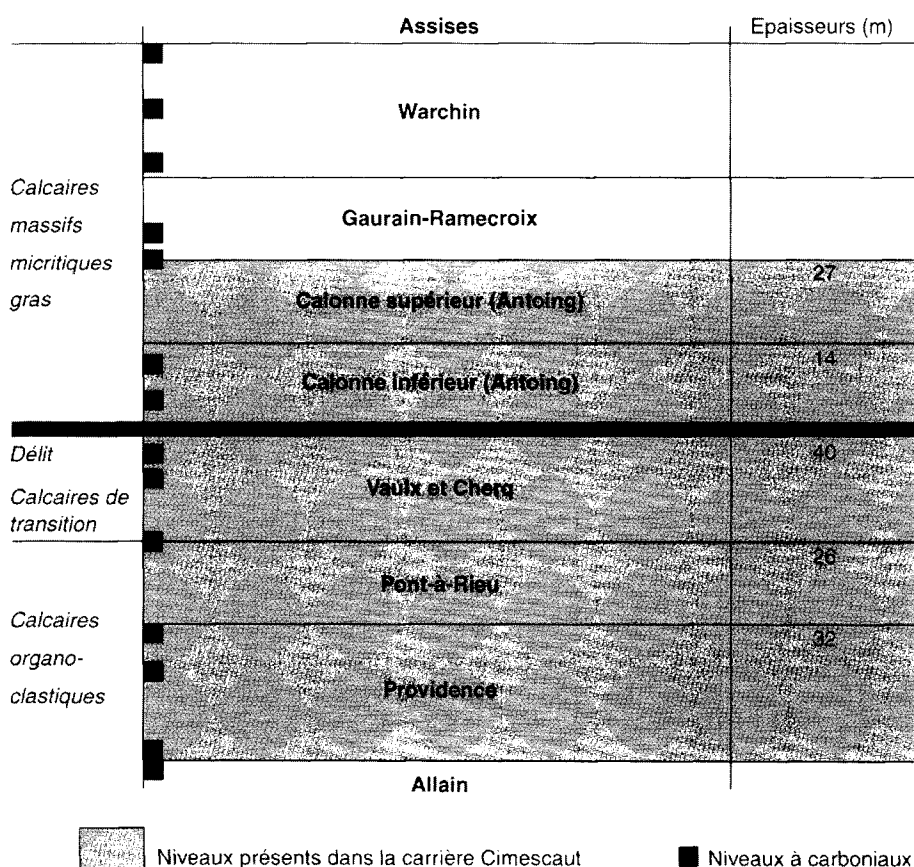


Fig. 1 - Log stratigraphique du calcaire tournaisien. En grisé, les niveaux présents dans la carrière Cimescaut. Les niveaux à carboniaux sont marqués.

relativement importante. Ces calcaires renferment aussi des pseudomorphoses de gypse et d'anhydrite, témoins du confinement du sédiment.

Extraction

Ce calcaire a été de tous temps l'objet d'une importante extraction. Il y a de nombreuses preuves de son utilisation dans le Tournaisis à l'époque gallo-romaine, tant comme pierre de taille que comme pierre à chaux. Par la suite, grâce aux voies fluviales, il s'est répandu dans tout le bassin de l'Escaut. Ainsi beaucoup de monuments anciens des Flandres, et surtout de Gand, sont en pierre de Tournai (Camerman et Rolland, 1944).

Niveaux présents dans la carrière

Une mission d'échantillonnage a été conduite dans le but de prélever des blocs représentatifs des cinq niveaux affleurant dans la carrière Cimescaut d'Antoing.

Dans cette carrière les différents niveaux fournissent soit des matériaux pour la fabrication du ciment (niveaux « Calonne Supérieur » et « Pont-à-Rieu ») ; soit des pierres concassées (niveaux « Calonne inférieur », « Vaulx et Cherg » et « Providence »).

Le tableau I présente la localisation des échantillons ayant été sélectionnés pour l'étude.

Caractéristiques du calcaire

À l'état frais, la « pierre de Tournai » a une teinte qui évolue du gris au gris bleuté, ce qui a donné les appellations de « bancs de gris » et « bancs de bleus » plus foncés. Dans les deux ensembles, se rencontrent des horizons riches en carboniaux dont plusieurs revêtent

une valeur stratigraphique locale. Les carboniaux, sont des rognons noirs, extrêmement durs, répartis en niveaux bien visibles sur la figure 2 (photographie de quelques blocs épars). D'un point de vue minéralogique, ce sont des accidents siliceux (assimilables à des cherts), ayant la texture et la composition d'une calcédoine et/ou d'une opale ; il s'agit donc d'une silice microcristalline réputée avoir une réactivité aux alcalins importante.



Fig. 2 - Blocs de calcaires incluant des niveaux à carboniaux (lentilles noirâtres).

La silice diagenétique signalée dans la bibliographie a pu être mise en évidence au microscope électronique à balayage. En effet après une légère attaque acide (3 min dans une solution d'HCl dilué au 1/200^e) pratiquée sur des sections polies, un fin réseau siliceux est visible à un grossissement de l'ordre de $\times 500$ (fig. 3). Il n'a pas été possible d'observer ce réseau siliceux au microscope pétrographique classique puisque son épaisseur est comprise entre 4 et 10 μm .

Ces deux types d'accidents siliceux, les carboniaux et la silice diagenétique, présents à des échelles différen-

TABEAU I

Niveau dans la carrière <i>puissance du banc</i>	Localisation du prélèvement	Référence de l'échantillon LCPC
« Calonne supérieur » 27 m Pierre à ciment	Sommet du niveau	CS1
	Base du niveau	CS2
« Calonne inférieur » 14 m Pierre à concasser	Sommet du niveau (sans carboniaux)	CI1
	Environ 7 m sous le niveau repère à carboniaux	CI2
	Environ 4 m au dessus du « gras délit »	CI4
Niveau repère du « gras délit »		
« Vaulx et Cherg » 40 m Pierre à concasser	Environ 8 m sous le « gras délit »	VC1
	Environ 12 m au dessus de la limite « Pont-à-Rieu »	VC2
	À la base du niveau	VC3
« Pont-à-Rieu » 26 m Pierre à ciment	Environ 10 m sous le sommet du niveau	PR1
« Providence » 32 m Pierre à concasser	Environ 3 m sous le « banc à moules »	P1
	À la base des niveaux de carboniaux	P2
	À la base de l'exploitation Janvier 1997	P3

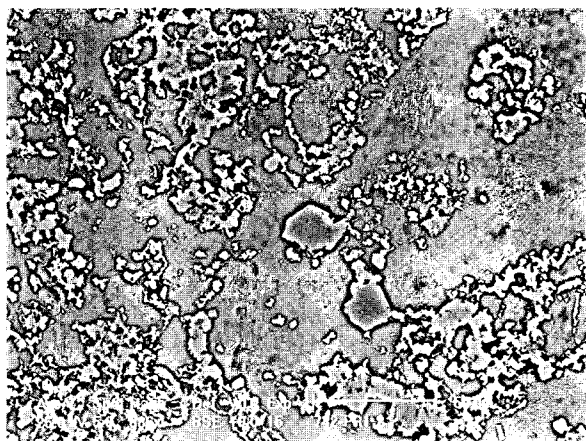


Fig. 3 - Vue d'une section polie de calcaire ayant subi une attaque acide.

tes, sont susceptibles de constituer le siège d'une réactivité aux alcalins de cette pierre de Tournai.

Quantification de la réactivité aux alcalins

Après avoir identifié deux responsables potentiels de la réactivité aux alcalins, il convient de la quantifier. Si les carbonatés sont des accidents siliceux que l'on pourrait qualifier d'évitables puisque pluricentimétriques à pluridécimétriques, (ceci est valable à l'échelle de notre échantillonnage, mais pas à celle de l'exploitation), le fin réseau de silice diffuse l'est beaucoup moins. Des investigations analytiques ont été mises en œuvre pour éclaircir la part de responsabilité de chacun des « acteurs » de ce calcaire. Pour cela, des analyses et essais classiques dans ce domaine ont été réalisés. Ils passent par une analyse chimique complète avec détermination du résidu insoluble et par une qualification du granulat vis-à-vis de l'alcali-réaction par un essai rapide d'autoclavage (Normes P18-590.)

Pour cerner plus précisément les différentes formes de silice et tenter de les quantifier, ont été menées une série d'observations au microscope électronique à balayage a été menée sur des sections polies issues des différents niveaux échantillonnés, ayant subi une légère attaque acide.

Analyses chimiques

Pour une caractérisation systématique de chaque banc, des analyses chimiques adaptées aux roches carbonatées ont été effectuées. L'essai a pour but de quantifier le résidu insoluble obtenu à l'issue d'une attaque par HCl au 1/50^e, suivie d'une calcination. L'analyse élémentaire sur le résidu insoluble permet un dosage des cations majeurs (Si, Al, Fe, Ca, Mg) par spectrométrie d'émission plasma après fusion au métaborate de lithium et reprise chlorhydrique. Le dosage des alcalins est fait par spectrométrie de flamme après fusion au métaborate de lithium et reprise chlorhydrique.

Les résultats de ces analyses chimiques (tableau II) montrent que les différents niveaux calcaires présentent des valeurs de résidus insolubles comprises entre 8 et 35 %, conduisant à des teneurs en silice évoluant de 6 à 33 % (au sein du même banc d'ailleurs).

Essai d'autoclavage P 18-590

Cet essai est pratiqué sur la fraction granulométrique 0,16/5 mm, obtenue, dans notre étude, par concassage d'un bloc de roche par niveau testé. Les principales caractéristiques de l'essai sont regroupées dans le tableau III.

Les résultats de l'essai d'autoclavage selon la norme P 18-590 sont présentés dans le tableau IV. Ils montrent que le gisement est assez homogène, mais de toute façon au-dessus du seuil de réactivité de 0,15 % (de 0,26 à 0,52 %). Ceci revient à dire qu'une exploitation

TABLEAU II
Résultats des analyses chimiques

Réf. LCPC	Carbonates %	Résidu insoluble %	Analyse du résidu insoluble								Total %	Total SiO ₂ %
			SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	CaO %	MgO %	Na ₂ O %	K ₂ O %			
CS1	77,31	22,69	84,09	8,88	2,62	0,37	1,01	0,14	1,81	98,92	19,08	
CI1	78,64	21,36	89,40	4,68	1,40	0,56	0,54	0,38	0,97	97,93	19,09	
CI2	81,88	18,12	92,58	4,58	0,05	0,47	0,50	0,27	0,93	99,38	16,77	
VC1	85,76	14,24	91,75	3,72	1,61	0,70	0,44	0,17	0,85	99,24	13,06	
VC2	83,84	16,16	86,45	5,97	2,35	0,65	0,70	0,15	1,20	97,47	13,77	
PR1	81,85	18,15	85,26	8,46	3,14	0,30	0,91	0,18	1,60	99,85	15,47	
P1	64,44	35,56	93,28	0,86	0,50	0,69	0,70	0,06	0,23	96,35	33,21	
P2	78,25	21,75	95,98	2,04	0,78	0,27	0,17	0,11	0,50	99,85	20,87	
P3	91,67	8,33	79,47	11,52	3,54	0,54	1,38	0,29	2,47	99,21	6,62	

TABLEAU III
Conditions de réalisation de l'essai à l'autoclave

Granularité	0,16 / 5 mm 20 % → 0,16 - 0,63 mm 50 % → 0,63 - 2,5 mm 30 % → 2,5 - 5 mm
Taille des éprouvettes	4 × 4 × 16 cm
Composition du mortier	600 g de ciment 1 200 g de sable à tester 300 ml d'eau déminéralisée + NaOH
Conservation	24 h dans l'eau à 20 °C
Conditions du test	5 h à 127 °C (0,15 MPa)
Mesures	Allongement
Seuil	0,15 %
Critère de non réactivité	Expansion inférieure à 0,15 % sur la moyenne de trois résultats

préférentielle d'un niveau n'est pas utile, l'ensemble du gisement étant potentiellement réactif (PR). De plus, si l'on se reporte au tableau d'analyses chimiques, il semblerait que la réactivité ne soit pas fiable à la teneur en SiO₂ mais peut-être plus à la forme sous laquelle elle est présente. Cette constatation nous a amenés à détailler l'étude microstructurale des niveaux.

Analyse d'images sur photographies prises au microscope électronique à balayage

La mise en œuvre d'une telle démarche a été dictée par le fait que nous disposions d'un échantillonnage complet d'un front de taille (représentant des conditions de

sédimentation d'une même période géologique), pour lequel plusieurs types d'informations étaient disponibles. Il s'avérait donc intéressant de vérifier si l'analyse des images réalisées par l'intermédiaire d'un microscope électronique à balayage pouvait être reliée directement à l'un ou plusieurs des paramètres à notre disposition (analyse chimique ou essai d'autoclavage).

Conditions d'observation et saisie des images

Les échantillons de chaque banc de calcaire ont été polis, attaqués à l'acide chlorhydrique dilué au 1/200^e, puis observés au microscope électronique à balayage. Un cadre expérimental a été défini pour la prise d'images, en termes de tension d'accélération du faisceau d'électrons (25 kV), de diamètre de spot (5), de grossissement (× 500), pour acquérir un maximum d'informations sur tous les faciès présentant un réseau siliceux. L'analyse a été faite sur une dizaine d'images par échantillon, pour avoir la meilleure représentativité statistique possible.

Traitement des images

Les images sont traitées par un logiciel d'analyse d'images fonctionnant sur Macintosh (fig. 4). Dans le but de limiter les interventions manuelles d'optimisation de l'image, les algorithmes standards proposés dans les différentes bibliothèques du logiciel ont été utilisés. La succession des opérations de traitement peut-être résumée ainsi :

- Chargement des images saisies au microscope électronique à balayage (24 bits),

TABLEAU IV
Résultats obtenus à l'essai P18-590 sur les différents bancs échantillonnés

Réf. LCPC	CS1	CI1	CI2	VC1	VC2	PR1	P1	P2	P3
Allongement moyen %	0,52	0,50	0,43	0,44	0,41	0,40	0,46	0,26	0,27
Réactivité	PR*	PR	PR	PR	PR	PR	PR	PR	PR

PR* : potentiellement réactif.

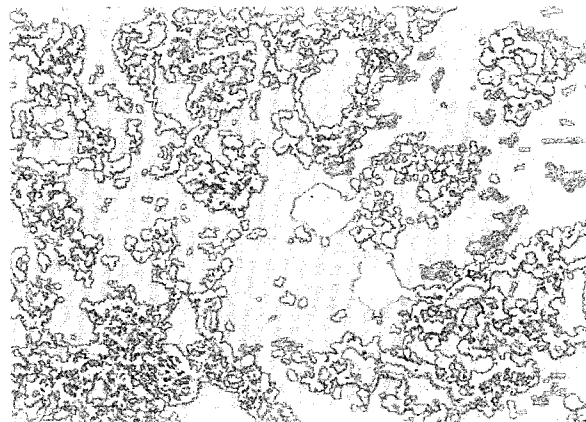
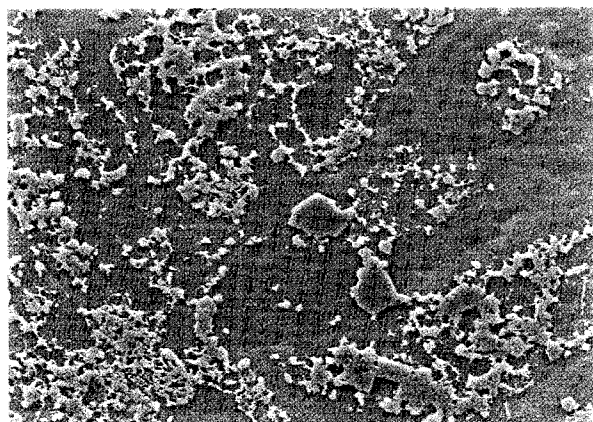


Fig. 4 - Exemple d'analyse d'image pour la caractérisation du réseau siliceux.

- Extraction du plan « luminance », puis égalisation (correspondant à la répartition des niveaux de gris de l'image sur les 255 niveaux de gris disponibles), (8 bits),
- Visualisation du spectre par un histogramme,
- Choix du niveau pour le seuillage, puis seuillage manuel, pour l'obtention d'une image binaire,
- Filtrage par un filtre « passe-bas », qui a pour action de « nettoyer » l'image des particules isolées,
- Comparaison avec l'image « luminance » originale, et enfin quantification du réseau siliceux.

Récapitulation des résultats

Les résultats des essais réalisés sur les bancs échantillonnés, sont regroupés dans le tableau V.

La colonne du tableau V donnant les comptages obtenus par analyse d'images, contient un chiffre anorma-

lement élevé de 45 % pour l'échantillon P1. Ceci peut trouver une explication dans la répartition des tailles des particules retenues dans ce traitement informatique.

Le tableau VI distingue les particules en fonction des tailles pertinentes compte-tenu du phénomène suspecté. La comparaison des comptages a été établie entre les niveaux P1 et VC1 qui présentent une teneur en silice totale similaire, des valeurs proches pour l'essai P 18-590, mais de grandes disparités pour la silice qualifiée de libre (hors argiles).

Si l'on considère le réseau siliceux fin (donc probablement le plus délétère car le plus facilement solubilisable en milieu alcalin), avec une taille maximum de particules déterminée à la suite des observations microscopiques à environ $200 \mu\text{m}^2$ ($180 \mu\text{m}^2$), l'échantillon VC1 possède 100 % de particules faisant partie de cette catégorie alors que l'échantillon P1 con-

TABLEAU V
Synthèse des résultats des essais

Réf. LCPC	Concerne le résidu insoluble		Concerne l'analyse chimique totale				
	Résidu insoluble (%)	SiO ₂ (%)	SiO ₂ total (%)	SiO ₂ * (des argiles) (%)	SiO ₂ (« libre ») (%)	Allongement (P 18-590) (%)	Analyse d'image de surface (%)
CS1	22,69	84,09	19,08	4,03	15,05	0,52	24
CI1	21,36	89,40	19,09	2,00	17,09	0,50	35
CI2	18,12	92,58	16,77	2,79	13,98	0,43	25
VC1	14,24	91,75**	13,06	2,79	10,27**	0,44	22**
VC2	16,16	86,45	13,97	5,45	8,52	0,41	24
PR1	18,15	85,26	15,47	9,25	6,22	0,40	16
P1	35,56	93,28***	33,21	0,31	32,90***	0,46	45***
P2	21,75	95,98	20,88	2,67	18,21	0,26	28
P3	8,33	79,47	6,62	1,00	5,62	0,27	10

SiO₂* : nouveau pourcentage si l'on considère la silice qui peut être utilisée dans les argiles, et correspondant à la consommation totale de l'alumine suivant une formule du type [Si₄O₁₀(OH)₈]Al₄.

TABLEAU VI
Comparaison des échantillons VC1 et P1

Dimensions des particules	VC1			P1		
	Analyse d'images : 22% SiO ₂ « libre » : 10,27 %		P18-590 : 0,43 % SiO ₂ total : 91,75 %	Analyse d'images : 45 % SiO ₂ « libre » : 32,90%		P 18-590 : 0,40 % SiO ₂ total : 93,28 %
	Nb. particules	Particules (%)	Surface (%)	Nb. particules	Particules (%)	Surface (%)
< 25 μm^2	395	36	10	370	78	1
25 à 180 μm^2 (moyenne 75 μm^2)	704	64	90	46	10	0,7
Total pour le réseau siliceux fin			100			1,7
> 180 μm^2 (moyenne 9 000 μm^2)	0	0	0	55	12	98,3
Total pour les particules siliceuses « grossières »			0			98,3

tient moins de 2 % de particules entrant dans cette même catégorie. Il s'avère donc que les 2 % de silice répartie en fin réseau sont une quantité suffisante pour obtenir un critère de réactivité supérieur au seuil de 0,15 % dans le cadre de l'essai P 18-590. La silice plus grossière participe aussi à la réaction, mais probablement avec des effets atténués.

Essais sur béton

Les essais de performance

La première partie de l'étude a mis en évidence la réactivité de ce calcaire tournaisien vis-à-vis des alcalins. Il s'agit maintenant de déterminer la quantité maximum d'alcalins autorisée dans les formules de béton pour utiliser ce granulats en toute sécurité. L'essai choisi pour répondre à cette question a été l'essai de performance qui est actuellement le seul essai disponible pour tester la réactivité du granulats en utilisant une formule de béton réelle. Plusieurs gâchées ont été confectionnées en utilisant le calcaire tournaisien en granulats et un sable non réactif, mais aussi des formules incorporant toute la production de la carrière Cimescaut, allant de la fraction granulats à la fraction fine.

Le seuil de réactivité pour cet essai (60 °C – 100 % Humidité Relative) correspond à un allongement de 0,02 % à 3 mois. À cause de la pétrographie du granulats (documentation, recommandation, références, etc.), on peut tirer plusieurs observations de la figure 5 :

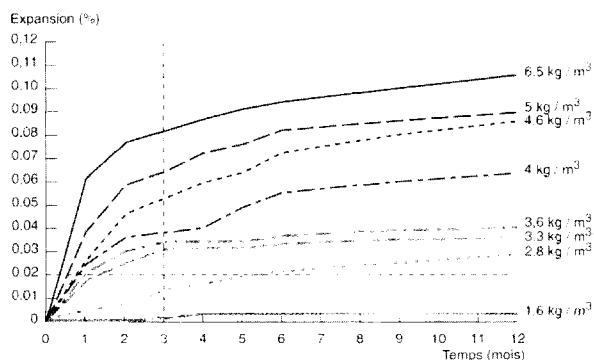


Fig. 5 - Comparaison du gonflement des bétons constitués de gravillon PR Cimescaut et de sable NR avec des teneurs croissantes en alcalins. Sable NR (non réactif 0/5 mm de nature calcaire). Gravillon PR (potentiellement réactif) 5/20 mm de la carrière Cimescaut. Teneur en alcalins évoluant de 1,6 à 6,5 kg/m³.

- la teneur maximale en alcalins autorisée pour obtenir des allongements inférieurs au seuil de 0,02 % à 3 mois est égale 2,8 kg/m³ ;
- cette teneur en alcalins correspond à un dosage en ciment de 400 kg/m³ (dosage compatible avec les dosages habituellement utilisés pour la construction d'ouvrages d'art) d'un ciment à 0,77 % de Na₂O_{éq.} ;
- pour la plupart des teneurs en alcalins les courbes ne sont pas à l'asymptote, même à 5 mois. Pour les essais qui ont été poursuivis, l'asymptote n'est toujours pas atteinte pour les dosages extrêmes à un an ;

➤ l'utilisation d'un sable non réactif a été guidée par l'idée que si la partie la plus fine du mélange granulaire était non réactive la réactivité, du gravillon s'en trouverait atténuée. Il n'en est rien comme le montre la figure 6.

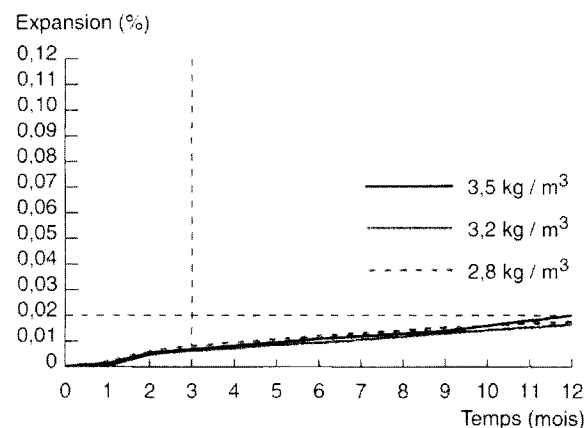


Fig. 6 - Comparaison du gonflement des bétons constitués de gravillon PR Cimescaut et de sable PR Cimescaut avec des teneurs croissantes en alcalins. Sable PR 0/5 mm de la carrière Cimescaut. Gravillon PR 5/20 mm de la carrière Cimescaut. Teneur en alcalins évoluant de 2,8 à 3,5 kg/m³.

Sur le graphe, figure 6, on observe que :

- l'utilisation d'une fourniture complètement réactive de calcaire Cimescaut produit des gonflements moindres à des teneurs en alcalins comparables (2,8 % et 3,6 %) ;
- la teneur de 3,6 % en Na₂O_{éq.} est tolérable si la fourniture est entièrement PR. Cette constatation est nouvelle et offre de belles perspectives pour la commercialisation de ce calcaire, qui permet d'utiliser une gamme plus étendue de ciments (avec des impératifs sur la teneur en alcalin moins bas) mais surtout d'utiliser la totalité de la courbe granulométrique de la même fourniture (de 0 à 20 mm).

De cette dernière constatation est née l'idée d'aller plus loin, en utilisant les fines produites lors du concassage du calcaire Cimescaut pour obtenir une courbe granulométrique plus complète. Ces fines pourraient avoir un effet de correction granulaire et, éventuellement, une fonction liante à déterminer, ou bien, une action inhibitrice vis-à-vis de l'alcali-réaction. Ceci a entraîné des études complémentaires sur les fines récupérées dans la chaîne de concassage.

Étude du filler Cimescaut

Trois questions étaient posées :

- a) Les propriétés du filler sont-elles homogènes compte-tenu de la non dissociation des niveaux géologiques dans l'exploitation de la carrière ?
- b) Le filler a-t-il une activité au sens des normes NF P 18-508 (juillet 1995) pour les additions calcaires et NF EN 450 pour les cendres volantes pour béton ?

c) Le filler a-t-il un effet réducteur voire inhibiteur de l'alcali-réaction dans les formulations de béton connues pour manifester cette pathologie ? Si tel est le cas, son incorporation dans les bétons non sujets à l'alcali-réaction ne provoque-t-elle pas l'apparition de ce comportement ?

Une étude classique en vue de déterminer les caractéristiques physico-chimiques de ce filler a été menée et les résultats sont résumés ci-après.

Homogénéité du filler

La production de ce filler 742-F a été analysée chimiquement sur 6 mois de production (tableau VII et tableau VIII).

Ce filler présentait 18,8 % de résidu insoluble constitué de 79 % de SiO₂, soit environ 15 % de SiO₂ total. Ces teneurs placent cette fine en dehors du domaine normatif des additions calcaires.

Granulométrie du 742-F

Le filler Cimescaut, avec un diamètre médian de 10 μm, se situe entre les fumées de zircon et de silice, dont les tailles de grains médians valent respectivement 0,1 et 2 μm, et les ciments de type CEM I 52.5 et se compare à un filler calcaire. La courbe granulométrique du filler 742-F le situe favorablement par rapport aux cendres volantes et aux additions siliceuses commercialisées dans le Nord de la France (donc comparables régionalement au filler Cimescaut) (fig. 7).

D'un point de vue granulométrique le diamètre médian de 10 μm est un élément déterminant pour permettre aux composants siliceux amorphes (donc réactifs aux alcalins comme le sont les fumées de silice et de zircon), de développer une réactivité lors de l'hydratation du béton.

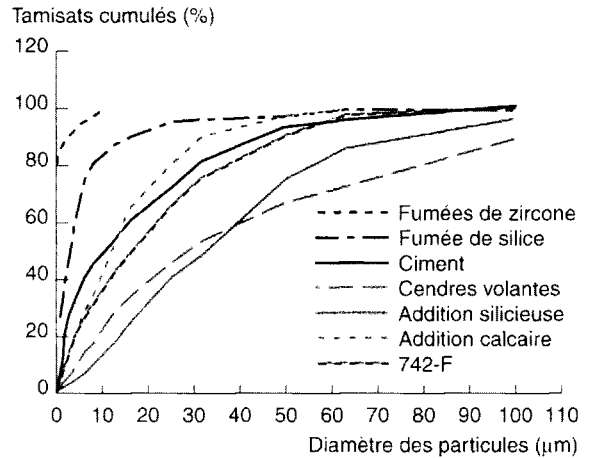


Fig. 7 - Position du filler 742-F par rapport à d'autres additions courantes.

Détermination de l'indice d'activité

À ce jour, cinq « additions pour béton » font l'objet de normes : « Additions calcaires », « Additions siliceuses », « Cendres volantes », « Fumée de silice », « Laitier vitrifié et broyé ». Le filler Cimescaut ne trouve pas sa place dans ces normes, à cause de sa teneur en SiO₂. Aucune norme « Farine de roche » n'est actuellement disponible pour classer ce type de minéralogie. En conséquence, pour l'évaluation des propriétés du filler qui nous préoccupe, nous avons appliqué les principes édictés dans les normes relatives aux fillers calcaires ou siliceux.

L'indice d'activité varie de 0,82 à 7 jours à 0,75 pour 28 jours et 90 jours. La norme sur les additions calcaires (la moins éloignée pouvant s'appliquer à ce filler) fixe une valeur minimum de 0,71 à 28 jours, qui est largement atteinte dans le cas du 742-F y compris en comparant les résistances mécaniques sur des mortiers de même maniabilité.

TABLEAU VII
Analyse chimique totale moyenne du filler 742-F

%	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SrO	P.F.	Total	Na ₂ O _{éq} *
742-F	16,15	1,71	0,76	0,11	0,01	43,12	1,29	0,73	0,58	0,05	0,15	0,08	35,16	100,2	0,43

* % Na₂O_{équivalent} = Na₂O % + 0,658 K₂O %.

TABLEAU VIII
Comparaison avec d'autres additions classiquement utilisées dans le béton

	Masse volumique (g/cm ³)	Surface Blaine (cm ² /g)	SiO ₂ (cm ² /g)	Na ₂ O _{éq} (cm ² /g)
Fumée de silice	2,25	18 600	91	1,46
Cendre volante	2,55	4 100	55	1,94
Laitier	2,92	3 500	35	0,72
Filler 742-F	2,67	4 500	16,15	0,43

Aux trois questions posées en introduction de paragraphe, les réponses sont que :

- a) les propriétés du filler sont homogènes d'un point de vue chimique, physique et granulométrique ;
- b) le filler a une activité aux sens des normes retenues ;
- c) pour connaître son effet vis-à-vis de l'alcali-réaction, de nouveaux essais de performance sur formules de béton ont été réalisés.

Essais de performance incorporant le filler 742-F

Les taux d'incorporation du filler ont été choisis de 15 et 30 %, à raison de 50 % du poids substitué au ciment et 50 % substitué au sable. Cette répartition de l'ajout a été conçue pour utiliser éventuellement « l'effet pouzzolanique » ou « l'effet filler ». Derrière cette dernière appellation, il faut concevoir que, si les éléments du filler sont suffisamment petits vis-à-vis de la taille médiane des grains de ciment, ils peuvent combler les vides entre ces derniers, et ainsi contribuer à un accroissement de la maniabilité. Ou encore, à maniabilité constante, ils pourraient permettre une réduction d'eau toujours appréciable lorsque l'on se trouve face à un risque potentiel d'alcali-réaction ?

La formule de béton choisie a été la plus défavorable (celle susceptible de présenter les plus forts gonflements) qui incorpore un sable NR et le gravillon Cimescaut. Dans la légende de la figure 8, l'appellation NR, PR se rapporte à la réactivité du gravillon. Le pourcentage de remplacement du filler est donné entre parenthèse.

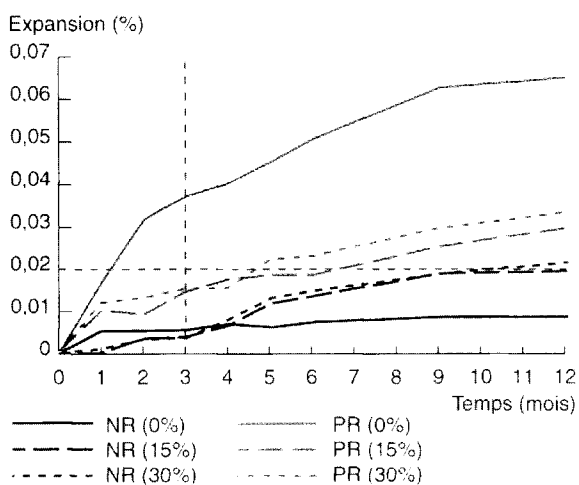


Fig. 8 - Gonflement au cours du temps de formules de béton comportant 0, 15 ou 30 % de filler 742-F.

Ces essais montrent que :

- l'incorporation du filler 742-F réduit les gonflements constatés sur les formules PR, les courbes 15 et 30 % étant pratiquement confondues. Le choix de la

quantité de fines à incorporer sera à envisager dépendra donc d'autres paramètres que le gonflement ;

- l'incorporation du filler 742-F ne produit pas de gonflement supplémentaire sur les formules NR.

Ces tendances se confirment encore au bout d'une année de mesures.

Une autre question a été examinée : est-il possible de dissocier l'utilisation du filler de son gravillon « père » ?

Des essais rapides ont été menés pour voir l'influence de ce filler 742 F sur son « père » mais aussi sur d'autres granulats d'origine et de compositions minéralogique différentes. Les résultats sont présentés sur la figure 9. Les taux d'incorporation du filler 742 F apparaissent en légende (0 %, 10 %, 20 %, 30 %).

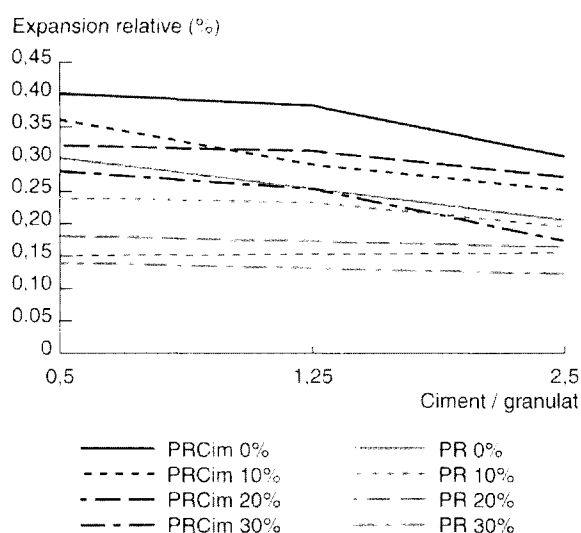


Fig. 9 - Allongement d'éprouvettes de mortier (suivant l'essai NF P 18-590) comportant le granulat PR Cimescaut et le Filler « fils » 742-F à des taux de remplacement de 0, 10, 20, 30 % et un autre granulat PR et le filler 742-F aux mêmes taux de remplacement.

Le protocole de cet essai a consisté en une adaptation de l'essai normalisé P 18-590, en changeant les rapports ciment/granulat : ces rapports C/G sont de 0,5, 1,25 et 2,5.

Les résultats des essais sur le granulat « père » et le filler « fils » montrent que le filler réduit l'expansion enregistrée avec la formule sans addition. L'effet est d'autant plus important que la quantité d'addition est grande (des taux d'incorporation volontairement importants ont été réalisés pour bien voir les effets de celle-ci). Si l'on mélange un autre granulat PR d'une composition minéralogique complètement différente, avec le même filler 742-F, les résultats sont aussi parlants : le filler 742-F a un effet réducteur d'expansion, pouvant même rendre une formule PR totalement NR moyennant un taux d'incorporation de 30 %. Ce dernier résultat ouvre des perspectives intéressantes quant à l'utilisation future de ce produit fin, mais il reste à démontrer son efficacité à modifier les résultats mécaniques.

Conclusions

L'étude présentée dans cet article a duré environ deux ans et apporté une connaissance fine et complète du gisement de calcaire tournaisien de la carrière Cimescaut.

Elle a confirmé la réactivité des différents bancs, tout en montrant qu'il existait une hétérogénéité importante au sein du gisement. Les responsables identifiés de cette réactivité se situent à la fois au sein des niveaux de carboniaux (ce qui était déjà connu), mais aussi et surtout à l'échelle microscopique dans un fin réseau de silice mal cristallisée.

Les essais de performance sur formule de béton réalisés avec des teneurs croissantes en alcalins ont montré que :

- la teneur maximale en alcalins autorisée pour une formule à gravillon Cimescaut PR et sable NR est d'environ $2,8 \text{ kg/m}^3$;
- cette teneur peut augmenter à environ $3,6 \text{ kg/m}^3$ pour une formule à (gravillon + sable) Cimescaut PR ;
- l'utilisation du filler extrait à partir de la production de ce calcaire présente de plus des caractéristiques intéressantes en terme de granulométrie, de propriétés physiques et d'activité. Incorporé à des formules « tout Cimescaut » il réduit notablement les expansions et, incorporé à des formules impliquant un autre granulats potentiellement réactif (PR) il peut même rendre la formule non réactive (NR).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

DUPUIS C., CHARLET J.-M., DEMARET M., GROESSENS E., HENNEBERT M., LOUWYÉ S., VAN GROOTEL G., VERNIERS J. (1993), *Aspects méconnus et nouveaux du Bassin de Mons et de son soubassement*, Association des Géologues du Bassin de Paris, 54 pages.

CAMERMAN C., ROLLAND P. (1944), *La Pierre de Tournai, son gisement, sa structure et ses propriétés, son emploi actuel, son emploi dans le passé*. Mémoires de la Société Belge de Géologie, nouvelle série in-4°, n° 1, 115 pages.

Recommandations pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction, 1994, publication LCPC, 51 pages.

Norme P 18-508 : Additions pour béton hydraulique : « Additions calcaires ». AFNOR juillet 1985, 22 pages.

Norme P 18-509 : Additions pour bétons hydrauliques : « Additions siliceuses ». AFNOR mai 1997, 12 pages.

Norme P 18-590 : Stabilité dimensionnelle en milieu alcalin. Essai accéléré sur mortier par autoclavage. AFNOR Avril 1993, 7 pages.

ABSTRACT

A study of Tournaisian limestone from the Cimescaut quarry at Antoing (Belgium) : petrographic and chemical analysis and investigation of reactivity with alkalis.

J.-S. GUEDON-DUBIED, G.CADORET, V.DURIEUX, F.MARTINEAU, P.FASSEU, V.VAN OVERBEKE.

This paper analyzes potential uses for limestone from the Cimescaut quarry at Antoing (Belgium). The study begins with a petrographic and chemical examination of the various beds that are quarried at the site and a determination of the potential reactivity with alkalis using a standardized test (P18-590).

In a second stage, with a view to optimizing utilization of the quarry's entire production, three series of performance tests of concrete mixes were conducted as follows :

- the first containing the Cimescaut fine gravel fraction and a non-reactive sand,
- the second containing the fine gravel and sand fractions from Cimescaut,
- and the third containing the fine gravel, sand and fines fractions from Cimescaut.

The fines used in the last series of tests were obtained by crushing the Tournaisian limestone without any specific treatment. These fines could either be used to correct the particle size distribution, or as an additive for hydraulic concrete or even to inhibit the alkali reaction. A detailed assessment of the different types of concrete was conducted in order to test them and determine their potential.