UNIVERSITÉ DE LORRAINE

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4
Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10
http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php
http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm

Faculté des Sciences et Techniques

UFR Sciences et Techniques de la Matière et des Procédés
Ecole Doctorale EMMA

S.C.D. - U.H.P. NANCY 1
BIBLIOTHÈQUE DES SCIENCES
Rue du Jardin Botanique - BP 11
54601 VILLERS-LES-NANCY Cédex

THESE

Présentée pour l'obtention du titre de

Docteur de l'Université Henri Poincaré, Nancy 1

en

Génie Civil

par

Jean VOIRIN

UTILISATION DES CALCAIRES DU BAJOCIEN LORRAIN EN TECHNIQUES ROUTIERES

Soutenue publiquement le 24 juin 2004 devant la commission d'examen

Rapporteurs	M. Jean BEBIEN	Professeur, Université de Paris Sud
	M. Jean Pierre TROALEN	Professeur, Université de Reims
Examinateurs	M. Bernard HAGUENAUEUR	Professeur Emérite, Université Henri Poincaré, Nancy 1
	M. René DEVIENNE	Professeur, Université Henri Poincaré, Nancy 1
	M. André LECOMTE	Maître de conférences, HDR, Université Henri Poincaré, Nancy 1
	M. Didier DESMOULIN	Ingénieur INSA, Directeur Technique SCREG EST
Invités	M. Michel BERTAUD	Docteur es sciences, Directeur Technique SCREG

EA 1116 ERIN – MMGC – Equipe « Modélisation et Matériaux du Génie Civil »
Le Montet – 54601 Villers lès Nancy Cedex

Laboratoire SCREG EST
2 rue Virginie Mauvais – 54015 Nancy Cedex

Directeur de thèse : M. André LECOMTE

Co – encadrant : M. Didier DESMOULIN

AVANT - PROPOS

Ce mémoire a été rédigé dans le cadre d'une convention de recherche passée entre le laboratoire (EA 1116) « Modélisation et Matériaux du Génie Civil » de l'Université Henri Poincaré – Nancy 1 - et le laboratoire de la société SCREG EST. L'encadrement des travaux a été assuré conjointement par Messieurs André LECOMTE (EA 1116) et Didier DESMOULIN (SCREG EST).

****

Salarié au laboratoire SCREG EST depuis 13 années, les travaux de recherches présentés ont été menés parallèlement à mon activité professionnelle. Ils se sont déroulés en différents sites de travail mis à ma disposition : la Faculté des Sciences de Vandoeuvre-lès-Nancy, le Département Génie Civil de l'IUT de Nancy - Brabois où est implanté le laboratoire MMGC et le laboratoire Screg Est.

****

Les travaux ci-après exposés doivent être considérés comme un complément aux nombreuses connaissances issues des programmes de recherche antérieurs sur la valorisation des matériaux locaux pour les ouvrages du B.T.P. Ils pourront servir, le cas échéant, de contribution à la réalisation d'un Guide d'emploi des ressources minérales calcaires de la Lorraine dans l'industrie du BTP.

****

L'approche retenue pour ces travaux relève du pragmatisme et de l'observation. Ces deux notions ont été les fils conducteurs permanents de notre démarche, afin que nos conclusions reflètent le plus fidèlement possible les observations faites durant la mise en œuvre ou lors de l'analyse du comportement sous sollicitation des techniques envisagées.

****

Plus précisément, nos recherches concernent l'utilisation des calcaires du Bajocien lorrain dans les assises de chaussées, dans le but de les substituer (autant que faire se peut) aux matériaux traditionnels « nobles » que sont les granulats alluvionnaires, principalement extraits du lit de la Moselle.

Jean VOIRIN, le 22 Avril 2004

S.C.D. - U.H.P. NANCY 1
BIBLIOTHÈQUE DES SCIENCES
Rue du Jardin Botanique - BP 11
54601 VILLERS-LES-NANCY Cédex

Je tiens en tout premier lieu à remercier les membres du jury pour avoir accepté de lire mon mémoire et pour avoir accepté de participer à ma soutenance de thèse.

Je tiens également à remercier toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation et à l'achèvement de ce travail :

- Monsieur le Professeur Bernard HAGUENAUER, pour m'avoir initialement accueilli au sein de son laboratoire (JE 1116 Structures et Matériaux) et pour m'avoir fait part de ses remarques et conseils tout au long de ce travail. De plus, je tiens à le remercier de m'avoir accordé sa confiance lorsqu'en 1996 il a répondu favorablement à ma demande de reprise universitaire de mes études.
- Monsieur Christian LAVEDRINE, Président Directeur Général de SCREG EST qui, par son accord pour financer les travaux, a pu rendre matériellement possible l'aboutissement de ce travail.
- Monsieur Didier DESMOULIN, Directeur Technique de SCREG EST pour avoir accepté que je puisse mener à bien ce projet de *formation* personnelle. Il a su, dans la mesure de son emploi du temps particulièrement chargé, être à mon écoute et m'apporter son soutien tant moral que matériel. Je tiens également à le remercier pour m'avoir accordé le temps nécessaire à la finalisation de ce document. Je le remercie également pour m'avoir autorisé à utiliser l'infrastructure du laboratoire de SCREG pour effectuer des analyses pendant et en dehors des heures normales d'activité de la société.
- Monsieur André LECOMTE, Maître de Conférence HDR au Département de Génie Civil de l'IUT Nancy - Brabois, Directeur de cette Thèse, à qui je dois énormément. En effet, il a su être présent à chaque fois que j'ai été amené à le solliciter dans quelque domaine que ce soit. De plus, je tiens à le remercier pour

m'avoir suggéré et non imposé ses idées, ce qui, dans le cadre particulier de ces travaux, est inestimable. Que sa famille m'excuse également pour avoir dû parfois le rencontrer à son domicile parce que je n'avais pas toujours la liberté de me rendre à son laboratoire.

- Monsieur Christophe RIBETTE, Cadre technique à SCREG EST qui a réussi, malgré des plans de charges parfois importants, à me dégager du temps pour que je puisse réaliser certaines manipulations au laboratoire de SCREG.

- Monsieur Jean Michel MECHLING, Maître de Conférence au Département de Génie Civil de l'IUT Nancy - Brabois pour m'avoir donné de petits conseils pratiques qui m'ont conduit à revoir certains points de ce travail, mais également pour sa pédagogie au moment de l'analyse des lames minces.

- Monsieur le Professeur Jean HILLI, pour m'avoir guidé et aidé dans l'approche géologique que je souhaitais donner à ce travail. J. HILLI est l'un des spécialistes des formations carbonatées de notre région. Ses remarques de « passionné » ont toujours été pleines d'enseignement et il a su se mettre à ma portée pour que ces conseils soient en phase avec le travail qui m'a été confié.

- Monsieur Antoine LAVERRIERE, un de mes collègues de travail en qui j'ai une confiance sans limite et qui, sans avoir été impliqué directement dans ce travail a su par sa discrétion, son infatigable bonne humeur, ses mots chaleureux et ses « coup de mains » désintéressés me remettre bien souvent en selle lorsque la lassitude pointait dans ma tête.

- Monsieur et Madame Gilbert VOIRIN, mes parents, parce qu'ils méritent plus que d'autres mon entière reconnaissance. C'est à eux que je dois tout. Et puis aussi parce qu'ils ont su rester à mes cotés à tous moments pour me réconforter, me redonner de l'élan et assurer la logistique.

Je ne peux pas faire une liste exhaustive de tous ceux qui ont contribué directement ou indirectement à ce travail, mais je voudrais les remercier de tout mon cœur et je voudrais également qu'ils puissent se reconnaître dans ces lignes.

Merci à vous tous !

Enfin …

> *« Si le Tout Puissant m'avait consulté avant de s'embarquer dans la Création du Monde, je lui aurais recommandé quelque chose de plus simple ! »*

Alphonse X le Sage, XIII ième siècle.

RESUME

Le présent travail s'inscrit dans la démarche générale d'économie des matériaux alluvionnaires lorrains en voie d'épuisement. Il s'intéresse plus particulièrement, à l'emploi des granulats issus des formations calcaires du Bajocien lorrain dans les techniques pour assises routières. Les études économiques générales montrent que l'utilisation des roches carbonatées croît sans cesse en Lorraine et que cette ressource se substitue majoritairement aujourd'hui aux matériaux traditionnels, du moins dans le domaine des chaussées. Le manuscrit, qui commence par un rappel des notions générales ayant trait au domaine routier, s'attache à montrer que l'utilisation de ces matériaux ne pose pas de difficultés particulières en techniques routières, malgré la grande variabilité de leur faciès. Il faut cependant que la formulation soit bien adaptée et qu'un liant routier soit de préférence utilisé. Le thème de l'adhérence entre granulats calcaires et matrice cimentaire est ensuite abordé. On montre que les calcaires issus de roches massives développent de réelles qualités d'adhérence avec la matrice, notamment si le liant hydraulique contient du laitier. Une étude sur la cinétique de durcissement de ces mélanges prouve que les coefficients de correspondance normalisés, destinés à apprécier les performances à 1 an, utilisés aujourd'hui ne sont pas adaptés aux calcaires, qui réagissent chimiquement. Concernant la mise en œuvre des mélanges calcaires, nous confirmons que les courbes normatives sont pertinentes, dans l'attente d'un éventuel développement des méthodes de recomposition basées sur la théorie des empilements granulaires.

ABSTRACT

This work is set in the general focus of substitution of alluvial materials which are disappearing in Lorraine. More specifically, it looks at the use of aggregates taken from limestone formations in the Lorraine Bajocian banks for road subbases. Economic studies show that the use of carbonate rock keeps growing in Lorraine, surpassing traditional materials to the point of being the major resource for road building. This manuscript, which begins with a general overview of road building, displays how these materials don't cause any particular technical difficulties in this field even though they have a wide range of aspects. However, the formulation must be well adapted and binder use is preferable. The question of adhesion between limestone aggregates and cement matrix is then dealt with. It is demonstrated that limestone from massive rock has good adhesion properties with the matrix, especially if the hydraulic binder contains slag. A kinetic study of the setting of these mixes proves that standard equivalence coefficients, for the estimation of final performances, used now are not adapted to limestone, which reacts chemically. As to pertains to the elaboration of the limestone mixes, we confirm that the standard gradings are pertinent until an eventual improvement of recomposition methods based on aggregate stacking theory is established.

MOTS CLES

- Lorraine,
- Route,assises de chaussées,trafic,
- Normalisation,
- Granulats,matériaux,
- Calcaire,Bajocien,alluvionnaires,
- Ciments,liants hydrauliques,
- Produits routiers,GTLH,STLH,MTLH,GNT,
- Caractéristiques intrinsèques,coefficients LA et MDE,
- Essais mécaniques,traction,compression,module.

KEYWORDS

- Lorraine
- Road,subbase,traffic,
- Standardization
- Aggregates,materials,
- Limestone,Bajocian,gravel,
- Cements,hydraulic binders,
- Road products,GTLH,STLH,MTLH (hydraulic bound mixtures),GNT (no bounded mixtures),
- Intrinsic characteristics,LA and MDE coefficients,
- Mechanical tests,traction,compression,modulus.

µm	10^{-6} mètre
Ab	Coefficient d'absorption d'eau
b	Dimension de la base d'un prisme
BRGM	Bureau de recherches géologiques et minières
BTP	Bâtiment et travaux publics
C	Compacité (exprimée en %) 100-C = taux de vide (V) en %
C.A.	Chiffre d'affaires
CPA	Coefficient de polissage accéléré
d	Taille du grain la plus petite d'une fraction granulaire
D	Taille la plus grande d'une fraction granulaire
DTU	Document technique unifié
E (ou Et)	Module élastique d'un MTLH déterminé par traction directe
F	Force de chargement (en traction ou en compression)
Ff	Résistance à la traction par fendage
Fr	Force à la rupture
Fs	Coefficient de friabilité des sables
FTP	Fiche technique produit
g	Gramme
GNT	Grave non traitée
GTLH	Grave traitée aux liants hydrauliques
H (ou h)	Hauteur
ha	Habitant
I	Moment quadratique
Ic	Indice de concassage
IG	Indice de gélivité des granulats (ancienne norme)
KN	Kilo newton
Kt	Kilo tonne
LA	Coefficient Los Angeles
LCPC	Laboratoire central des Ponts et Chaussées
LSC+	Liant spécial craie (sté Holcim)
m	Mètre
Md	Masse d'échantillon soumise à essai
MDE	Coefficient micro-Deval en présence d'eau
ME	Million d'euros

MEB	Microscope électronique à balayage
Mf	Moment fléchissant
MIOM	Mâhefer d'incinérat ion d'ordures ménagères
MJA	Moyenne journalière annuelle
mm	Millimètre
MPa	Méga Pascal (=10 bar ou 10^{6} N/m^2)
Mt	Million de tonnes
MTLH	Matériaux traités aux liants hydrauliques
MVA	Masse volumique apparente
MVR	Masse volumique réelle
OPM	Optimum proctor modifié (on parle de références OPM : MVA sèche, Wt
PFi	Plateforme de classe « i »
Pi	Masse de passant cumulé sur un tamis d'ouverture i
PR	Propreté des sables
PTAC	Poids total à charge
Qi	Qualité de compactage sur chantier de type i (12,etc.)
R	Rayon
Rc	Résistance à la compression simple
RGRA	Revue générale des routes et aérodromes
Rt	Résistance à la traction directe
RTB	Résistance à la compression diamétrale (fendage brésilien)
S	Surface résistante
SETRA	Service dEtudes Techniques des Routes et Autoroutes
STLH	Sable traité au liant hydraulique
T	Trafic (ex : T3 =trafic de type 3)
TC	Trafic cumulé
u	Unité
v	Position de la fibre neutre
VBS	Valeur au bleu des sols
VRD	Voirie et réseaux divers
Vsi	Valeur supérieure spécifiée
Vss	Valeur inférieure spécifiée
W	Teneur en eau
Δl	Déformation réelle
ε	Déformation relative (appliqué à l'essai de traction directe dans ce document)
$\sigma 6$	Niveau de contrainte admissible pour 10^6 cycles

SOMMAIRE GENERAL

SOMMAIRE GENERAL

AVANT – PROPOS 2

REMERCIEMENTS 3

RESUME / ABSTRACT 6

MOTS CLES / KEYWORDS 7

ABREVIATIONS UTILISEES 8

SOMMAIRE GENERAL 10

INTRODUCTION GENERALE 16

PARTIE 1 - CONTEXTE DE L'ETUDE

1-1 NOTION DE ROUTE ET DE STRUCTURE ROUTIERE 23

111) INTRODUCTION 23
112) LA ROUTE 24
113) NOTION DE TRACE ROUTIER 24
114) NOTION DE CIRCULATION : CHARGE OU TRAFIC 25
115) NOTION DE DUREE DE VIE : LA FATIGUE 25
116) SOLLICITATION DE L'ASSISE CALCAIRE TRAITEE DANS LA STRUCTURE : LA TRACTION 29
117) PRINCIPALES FAMILLES DE STRUCTURES DE CHAUSSEES 31

1-2 LE CONTEXTE ECONOMIQUE DE LA LORRAINE ET SON INFRASTRUCTURE DE TRANSPORT 32

121) INTRODUCTION 32
122) SITUATION GEOGRAPHIQUE 32
123) ECONOMIE GENERALE 33
124) AXES DE TRANSPORTS 33

1-3 LA ROUTE : GRANDE CONSOMMATRICE DE GRANULATS 36

131) INTRODUCTION 36
132) CONSOMMATIONS DE GRANULATS DANS LE BTP NATIONAL ET LORRAIN 36
133) MATERIAUX DISPONIBLES EN LORRAINE 41
134) CONSOMMATION PAR TYPE D'OUVRAGE EN LORRAINE 42
135) CONCLUSION 46

1-4 SUBSTITUTION DES RESSOURCES ALLUVIONNAIRES 48

141) INTRODUCTION 48

142) ACTIONS ET POLITIQUES ENGAGEES ou ENVISAGEES 49
143) CONCLUSION 50

1-5 CADRE NORMATIF ACTUEL 52

151) PRESENTATION 52
1511) Textes officiels 52
1512) La normalisation dans le domaine routier 52
1513) La normalisation européenne 54
152) NORMALISATION DES GRANULATS 55
1521) La norme XP P 18-540 55
153) UTILISATION DES GRANULATS 58
1531) Recommandations des normes produits 58
1532) Recommandations du guide d'application des normes 59
154) CONCLUSION 63

1 – 6 PROJET D'OUVRAGE ET ETUDE EN LABORATOIRE 64

161) INTRODUCTION 64
162) REALISATION D'UN OUVRAGE ROUTIER : le rôle du service technique 65
163) ETUDE DES MATERIAUX EN LABORATOIRE 69
164) CONCLUSION 80

PARTIE 2 - GEOLOGIE DE LA LORRAINE ET CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX

2 – 1 NOTIONS DE ROCHES CALCAIRES 83

211) INTRODUCTION 83
212) LES ROCHES CALCAIRES 83
213) CLASSIFICATION DES ROCHES CALCAIRES 85
2131) Classification de Folk 85
2132) Classification de Dunham 86
2133) Comparaison des méthodes de classification 88

2 – 2 LE BAJOCIEN LORRAIN 89

221) INTRODUCTION 89
222) BASSIN PARISIEN 89
223) STRATIGRAPHIE DU BAJOCIEN LORRAIN 92
2231) Présentation des différents lithofaciès 92
2232) Description des lithofaciès 93
2233) Séquences principales de sédimentation à l'échelle de la Lorraine 96
2234) Classification des lithofaciès dans le référentiel de Dunham : cas de la région de Nancy 99

2 – 3 CARACTERISTIQUES GEOMECANIQUES DES ROCHES DU BAJOCIEN LORRAIN 102

231) INTRODUCTION 102
232) TEXTURE DES ROCHES CALCAIRE ET PROPRIETES INTRINSEQUES DES GRANULATS 102

233) CARACTERISTIQUES DES ROCHES DU BAJOCIEN 103
2331) Carrières de granulats calcaires en lorraine 103
2332) Travaux de P. Boëdec [I-2] 102
234) CONCLUSION 119

PARTIE 3 - RECHERCHES ET EXPERIMENTATIONS

3 – 1 RELATION ENTRE LES PROPRIETES MECANIQUES DES ROCHES ET DES GRANULATS 122

311) INTRODUCTION 122
312) CARACTERISTIQUES LA et MDE DES GRANULATS. BASE DE DONNEES POUR LA REGION EST DE LA FRANCE 123
313) CLASSIFICATION DES DIFFERENTES NATURES DE GRANULATS SELON XP P 18-540 125
314) SPECIFICITES DES CARACTERISTIQUES LA ET MDE DES CALCAIRES 127
315) CARACTERISATION DES CALCAIRES EN TRACTION ET EN COMPRESSION 130

3 – 2 ADHERENCE LIANT HYDRAULIQUE ROUTIER – GRANULATS. observation des zones de contact 140

321) INTRODUCTION 140
322) OBSERVATION DE L'ADHERENCE 142
323) RESISTANCE DE L'INTERFACE LIANT / GRANULAT 150
324) CONCLUSION 153

3 – 3 INFLUENCE DES FINES D'ATTRITION 154

331) INTRODUCTION 154
332) FINES D'ATTRITION ET CINETIQUE DE DURCISSEMENT 155
3321) Produits utilisés 155
3322) Mélanges étudiés 157
3323) Essais mécaniques 159
333) EMERGENCE CRISTALLINE 162

3 – 4 EVOLUTIONS GRANULAIRES DES MATERIAUX AU COMPACTAGE 163

341) PRESENTATION 163
342) PREMIERE ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE [O-1] 164
343) SECONDE ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE [O-2] 166

PARTIE 4 - PUBLICATIONS

PUBLICATION 1 175

RESISTANCE A LONG TERME DES MELANGES ROUTIERS TRAITES AUX LIANTS HYDRAULIQUES

PUBLICATION 2 176

CLASSIFICATION DES GTLH CALCAIRES ET PROPRIETES INTRINSEQUES DES GRAVILLONS

PUBLICATION 3 177

ANALYSE DES PROPRIETES DES GRAINS PAR MESURE DE LA COMPACITE DES TRANCHES GRANULAIRES

CONCLUSION GENERALE 178

BIBLIOGRAPHIE 184

GLOSSAIRE DE GEOLOGIE 190

RENVOIS DES ELEMENTS DANS LE TEXTE

Figures :	Dans le texte :	(***fig. AA-i***)
	Au dessus des figures :	***fig. AA - i*** : texte de présentation de la figure
Tableaux :	Dans le texte :	(***tab. AA-i***)
	Au dessus des figures :	***tab. AA - i*** : texte de présentation du tableau
Bibliographie :	Dans le texte :	[***INDICE – NUMERO***]
	Page de bibliographie :	***INDICE – NUMERO*** et référence de texte

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

La recherche qui m'a été confiée a pour but d'apporter une contribution à l'amélioration des connaissances des granulats calcaires pour leur emploi en techniques routières. Cette thématique est connue sous le vocable de "substitution" des ressources traditionnelles en granulats (comprendre : les matériaux d'origine alluvionnaire) par des matériaux naturels ou artificiels.

Cette prise de conscience n'est pas récente puisque, depuis plus d'une vingtaine d'années, les différents acteurs locaux se sont penchés sur ce problème. Par exemple, le programme MATERLOC CALCAIRE s'inscrivait dans cet esprit : son objet était de trouver des arguments techniques et scientifiques (et, si possible des réponses) à l'utilisation des calcaires lorrains en remplacement des granulats alluvionnaires habituellement employés.

En fait, l'idée n'est pas de passer du "tout alluvionnaire" au "tout calcaire", mais de créer une sectorisation d'emploi réfléchie des matériaux disponibles. Cette partition des potentiels repose sur le postulat qu'il est inutile de mettre en œuvre des granulats dont les pleines performances (ou bien leurs caractéristiques particulières – tel leur CPA – coefficient de polissage accéléré) ne seront pas utilisées alors que le niveau de service envisagé peut être atteint avec des matériaux de moindre qualité, tels que les calcaires bruts ou traités.

L'objectif de ces travaux est donc de contribuer à la création d'un guide technique relatif à l'emploi des matériaux calcaires lorrains en techniques routières. Un guide technique matériaux locaux est un guide qui explicite les dispositions techniques complémentaires et « confortatoires » permettant de compenser les écarts de performances des matériaux par rappel à la norme pour obtenir le même niveau de performance final fixé pour l'ouvrage. C'est bien dans cette optique que nous avons travaillé, en essayant d'adapter les procédés de référence (produits normalisés, mais aussi les habitudes) aux spécificités des granulats calcaires.

Ces travaux n'entendent pas être exhaustifs, bien au contraire. Il s'agit, pour nous, d'apporter une contribution, de par notre compétence professionnelle (producteur et utilisateur de matériaux calcaires), à l'ensemble des recherches déjà effectuées sur le sujet.

Nos recherches bibliographiques sur ce thème montrent l'intérêt évident porté à la question de la substitution granulaire, par la diversité des directions de recherches explorées. Celles-ci couvrent des domaines allant des études fondamentales aux études pratiques donnant directement les "recettes" pour une technique d'emploi donnée.

Structure du mémoire :

Le document présenté comporte quatre parties.

La première est dédiée à une description du domaine concerné par notre étude, pour préciser le *contexte* de nos travaux. Six thèmes sont exposés.

- Le premier est un rappel de certaines notions relatives à la *route* et aux *structures routières*, afin de faire un état des conditions d'emploi en service des matériaux concernés par nos recherches.
- Les deux thèmes suivants concernent le cadre économique de la Lorraine, tant au niveau de l'infrastructure routière (et des transports en général) qu'au niveau de la production / consommation de granulats dans l'industrie du BTP. Notre objectif : confirmer l'intérêt de la prise en compte du problème de l'épuisement des ressources traditionnelles (alluvionnaires de la Moselle principalement) mais, également, décrire de manière chiffrée sur la base des données de l'UNICEM, les actions positives déjà en cours d'application.
- Ces thèmes sont complétés par une présentation des actions plus « politiques » engagées pour la préservation des ressources alluvionnaires : c'est l'objet du quatrième thème.
- Un rappel des références normatives en vigueur sur le territoire national constitue le thème suivant. Ces références se déclinent sous forme de notes, textes, normes, etc. On s'attachera à montrer que les textes officiels ne ferment pas la porte à l'utilisation de matériaux « hors normes » ou « en limite de spécification », sous réserve que leurs performances soient démontrées par des études en laboratoire.
- Le dernier thème est consacré aux études des matériaux en laboratoire. Nous effectuons également un rappel synthétique de la place du « laboratoire » au sein du processus de la réalisation d'un ouvrage de type routier, par exemple.

La seconde partie traite essentiellement des matériaux locaux retenus dans le cadre de cette étude : les calcaires du Bajocien lorrain. Géographiquement, l'exploitation de ces matériaux s'avère une réponse judicieuse et palliative à la pénurie de matériaux alluvionnaires extraits de la Moselle, car le lit de la Moselle et les affleurements du Bajocien sont voisins et à proximité des centres de consommation de granulats (Nancy, Pont-à-Mousson, Metz, Thionville). Trois thèmes composent cette partie.

- En premier, nous nous sommes intéressés à la notion de « calcaire », en rappelant quelques généralités. Les méthodes de classification des roches carbonatées sont également abordées. Ces classifications sont importantes à évoquer car la description pétrographique des granulats de construction commercialisés deviendra une obligation contractuelle, dans le cadre de la prochaine mise en application des dispositions réglementaires européennes.
- Les granulats étudiés proviennent de carrières exploitant les différentes couches calcaires du Bajocien lorrain. Il nous est donc nécessaire de situer cette formation dans le contexte général du bassin sédimentaire parisien, de préciser la nature des faciès rencontrés par l'étude de coupes chronostratigraphiques et de faire référence à des travaux antérieurs sur cette même formation rocheuse.
- Le troisième thème montre grâce à une base de données relative aux caractéristiques mécaniques intrinsèques qu'il ne faut pas extrapoler ou interpoler les propriétés de ces matériaux calcaires sans études et sans mesures préalables car ces formations présentent de nombreuses variations latérales et verticales de faciès. Enfin, nous avons utilisé le code minier du BRGM pour localiser les carrières qui exploitent actuellement les calcaires du Bajocien.

La troisième partie du mémoire est axée sur l'expérimentation.

- Dans le premier thème, nous avons recherché d'éventuelles corrélations entre les caractéristiques mécaniques intrinsèques des granulats. Des valeurs des coefficients Los Angeles, micro-Deval, de résistances à la traction et à la compression de roches calcaires sont analysées. Les résultats ont été utilisés dans la troisième publication réalisée durant ces années de recherche (voir fin du document).

- Le second thème est axé sur l'emploi des granulats calcaires en techniques de MTLH (matériaux traités aux liants hydrauliques). Sur la base de prise de vue, nous abordons le thème de l'adhérence qui se développe entre les grains de roches constituant le squelette granulaire et le mortier hydraulique d'enrobage.
- Le troisième thème concerne l'influence des fines d'attrition (fines produites par le frottement des granulats entre eux lors des phases de transfert et de mise en œuvre des matériaux) sur la prise hydraulique des liants spéciaux routiers. Nous rapportons également une manipulation « avortée » qui concernait la mise en évidence d'espèce(s) cristalline(s) pouvant se développer en présence de granulats calcaires tendres traités aux liants hydrauliques.
- Enfin, nous avons repris et appliqué à notre contexte un travail expérimental conséquent mené au Centre d'Etudes Routières de Rouen, concernant l'évolution granulaire des matériaux lors de leur mise en œuvre.

La dernière partie de ce mémoire regroupe les trois publications rédigées au cours de ces travaux. **Elles présentent l'essentiel des résultats scientifiques obtenus qui ne sont donc pas détaillés dans les parties précédentes du mémoire**. Trois thèmes sont développés dans ces publications.

- La première publication concerne la cinétique de durcissement des MTLH. Les résultats présentés n'ont pas été démentis par les professionnels du domaine concerné, avec qui nous avons eu de nombreux échanges suite à la parution de cet article. Ces travaux montrent que le durcissement des GTLH est fonction de la nature chimique du couple granulats – liant et que la prise en compte des coefficients proposés dans les normes « produits » méritent d'être adaptés lorsque les mélanges sont à base de granulats calcaires.
- Les seconds travaux traitent de la relation entre les coefficients LA et MDE et les performances à terme des GTLH. Une alternative à ces essais qualificatifs est la prise en compte de la résistance à la traction de la roche.
- La dernière publication concerne les méthodes de mesures de la compacité des grains associées aux concepts *d'empilements granulaires*. Cette nouvelle voie de travail pourrait devenir un moyen alternatif pour la recomposition des GTLH (graves traitées aux liants hydrauliques), en particulier lorsque l'on est confronté au

problème du contraste des MVR (masses volumiques réelles). Actuellement, la méthode repose sur une recomposition massique. Mais, lorsque les MVR sont différentes, cette méthode n'est plus pertinente.

Nous conclurons sur l'ensemble des résultats présentés dans ce mémoire dans le but de voir apparaître rapidement un Guide d'emploi des calcaires lorrains dans le BTP.

Enfin, nous proposerons des axes de recherches et d'expérimentations complémentaires pouvant faire l'objet d'autres travaux, tels que :

- Continuer à renseigner la base de données (Rt, Et) des MTLH jusqu'à l'échéance de 360 jours pour tenir compte des nouvelles ressources en sites de production ouverts et des nouveaux liants hydrauliques.
- Continuer à rechercher la relation existant entre la performance en traction de la roche et les performances des MTLH réalisés avec cette ressource.
- Mettre en application et valider par l'expérimentation, la théorie des empilements granulaires pour les GTLH

S.C.D. - U.H.P. NANCY 1
BIBLIOTHÈQUE DES SCIENCES
Rue du Jardin Botanique - BP 11
54601 VILLERS-LES-NANCY Cédex

PARTIE 1

CONTEXTE DE L'ETUDE

1 – 1 NOTION DE ROUTE ET DE STRUCTURE ROUTIERE

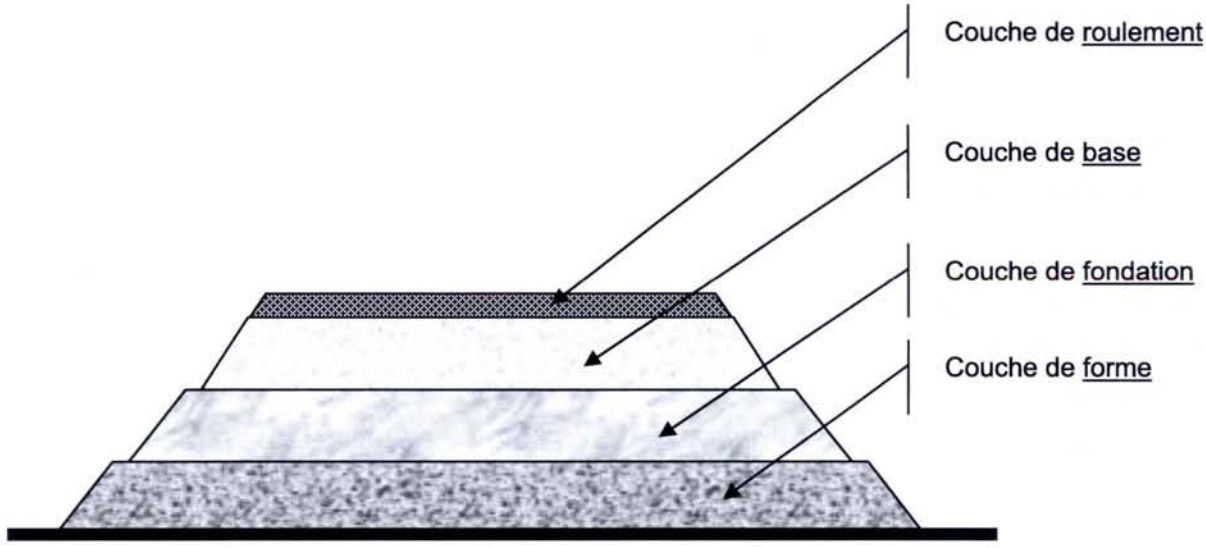
111) INTRODUCTION

Le présent mémoire traite de l'utilisation de granulats de nature calcaire dans le domaine de la construction routière, plus particulièrement au niveau de l'assise de la chaussée (***fig.11-1***).

Avant de développer notre travail, rappelons ce qu'il est convenu d'appeler route, autoroute, etc. Ces notions sont reprises ici de manière succincte pour ne dégager que les grandes lignes et les principes [***A-1***], [***A-2***]. La littérature à ce sujet est très complète et fait régulièrement l'objet de publications de synthèse, comme par exemple le récent (décembre 2003) numéro de la RGRA [***A-3***]

fig. 11-1 : coupe schématique d'une chaussée

L'assise d'une chaussée souple ou semi-rigide est composée d'une ***couche*** *de fondation et d'une couche de base en général. La couche de forme peut être intégrée dans la notion d'assise. Mécaniquement, la couche supérieure ou couche de roulement a pour fonction de reprendre les efforts verticaux et tangentiels apportés par le trafic et de les transmettre à la structure sous jacente. En dessous de la couche de forme se situe le domaine du terrassement qui est borné en partie haute par une surface appelée arase supérieure du terrassement. Une assise de chaussée est une structure multicouche.*



112) LA ROUTE

Une route est une voie de circulation de personnes et de biens entre deux points géographiquement distants.

Pour faciliter le déplacement des personnes et des matières, il convient que le trajet soit le plus « court » possible, qu'il soit accompli avec un maximum de sécurité pour les usagers et que l'ouvrage soit, d'un point de vue économique, un investissement pertinent et durable.

113) NOTION DE TRACE ROUTIER

Nous évoquons ici la notion de la longueur du trajet.

L'itinéraire final ou « tracé » prend en compte divers facteurs tels que l'environnement et la géographie locale, les contraintes financières, d'intégration dans le site, etc.

Les concepteurs doivent donc s'adapter au « terrain » sur lequel l'ouvrage devra « passer ». Le facteur géologique est un aspect essentiel de la définition de la qualité de l'assise de la chaussée.

D'autres paramètres géologiques et hydrogéologiques doivent être aussi pris en compte tels que la présence d'eau (nappe, cours d'eau, etc.), la nature des sols, la possibilité d'équilibrer les mouvements de terre (remblais / déblais) et la présence à proximité de sites d'emprunts de matériaux.

La reconnaissance préalable des terrains est essentielle en préambule (et en parallèle) à la conception des projets routiers [***A-4***].

Le tracé routier retenu est aussi défini en fonction des ressources disponibles pour sa réalisation. Les techniques de construction seront adaptées aux matériaux retenus pour limiter au maximum leur transport. On parle alors de l'utilisation de matériaux locaux.

114) NOTION DE CIRCULATION : CHARGE OU TRAFIC

Le déplacement des matières et des personnes est appelé « charge » Les contraintes engendrées devront être reprises par l'assise de la chaussée et transmise de manière admissible au sol support.

Pour la conception des chaussées, (c'est-à-dire le dimensionnement de la structure), seul le trafic « poids lourd » est pris en compte. Pour mémoire, on considère que le passage d'un poids lourd légalement chargé (essieu isolé de 130 kN appelé également « essieu de référence ») équivaut au passage d'un million de voitures légères. C'est pour cette raison que les méthodes de dimensionnement ne tiennent compte que du passage des véhicules lourds.

Le trafic est défini en fonction du nombre de poids lourds, par sens, par voie et par jour. Des classes de trafic (Ti) MJA (moyenne journalière annuelle) ont été déterminées comme exposées dans le Guide technique 1994 [***A-2***], mais une variante de comptabilisation est également prise en compte dans le Catalogue des structures types de chaussées neuves [***A-5***] : le trafic cumulé (TCi). Le trafic pris en compte est le nombre de poids lourds circulant sur la voie la plus chargée, cumulé sur la durée de dimensionnement de la chaussée.

115) NOTION DE DUREE DE VIE : LA FATIGUE

Le second facteur complétant la notion de circulation est la durée de vie que l'on compte attribuer à l'ouvrage. La durée de vie d'une chaussée est fixée dès le départ du projet : « L'ouvrage devra supporter tel trafic pendant tant de temps ».

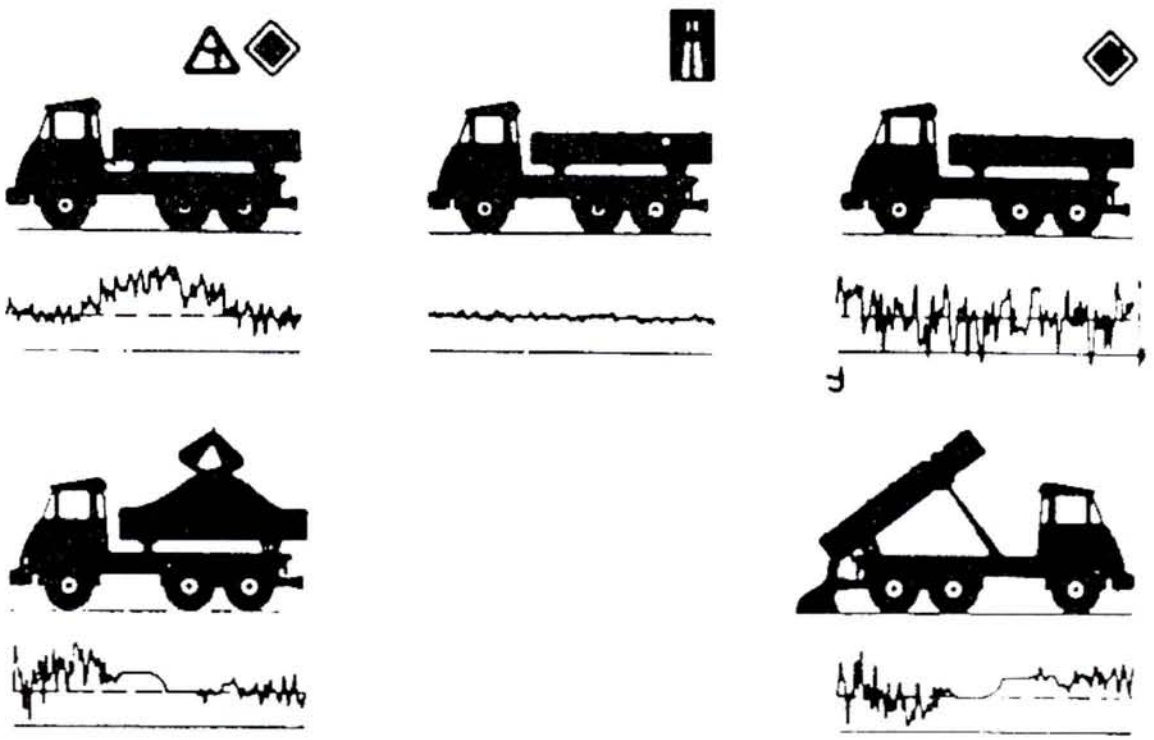
De plus toutes les structures calculées mécaniquement font l'objet d'une *vérification* de leur tenue vis-à-vis du gel et de l'endommagement supplémentaire au dégel par perte de portance du support.

L'objet de notre propos est d'expliquer simplement que la charge à reprendre par la structure est en fait une succession de charges et de décharges générant des mises en flexion / retour au repos de la structure, assimilée à un multicouche.

L'arrivée d'un véhicule à un endroit donné de la structure engendre une descente de charge qui se traduit par la flexion des différentes couches sous-jacentes. Son éloignement progressif permet à la chaussée de reprendre sa position initiale, parce qu'elle est « élastique ». En réalité, les mouvements de la chaussée sont assimilables à des phénomènes ondulatoires qui peuvent se révéler extrêmement complexes du fait du mouvement du véhicule. Le déplacement du véhicule est essentiellement fonction de deux facteurs : le type de voie qu'il emprunte et son activité sur cette voie.

Dans l'ouvrage de Bathias et Baïlon [***A-6***], il est montré différentes configurations d'activité d'un véhicule (donc de charges sur fusée) et les répercussions engendrées sur la mise en mouvement (ou mise en charge) de la structure sous-jacente (***fig. 11-2***)

fig. 11-2 : relevé des charges sur une fusée de camion dans différentes conditions de sollicitation



Cette succession de chargements / déchargements soumet la structure à de la « fatigue ». La limite de fatigue est également appelée « limite d'endurance ».

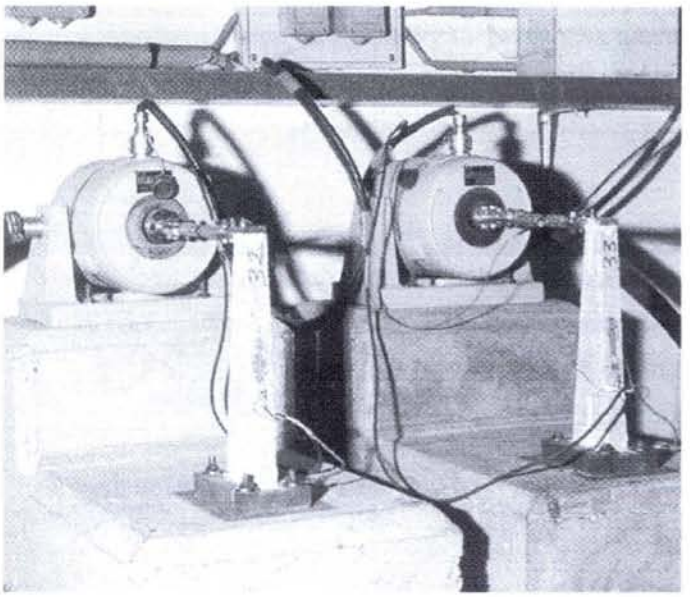
Le dimensionnement de la chaussée va donc avoir comme point de départ la détermination de la contrainte maximale répétable pour :

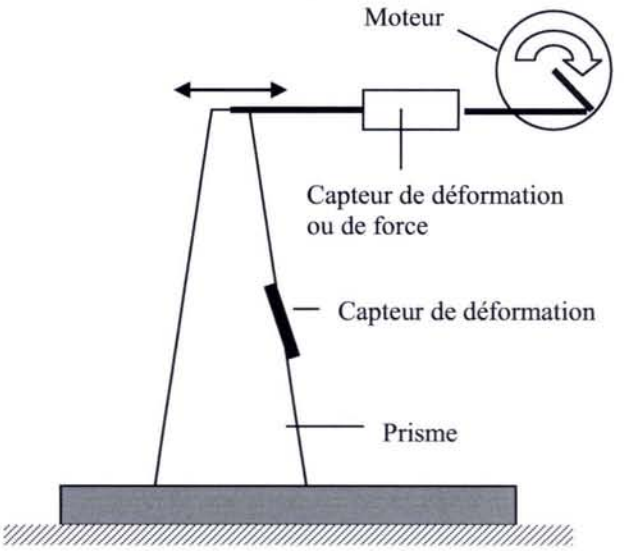
- une technique de construction donnée,
- une durée de vie de l'ouvrage (en terme du nombre de chargements cumulés).

Remarque : la notion de fatigue ne concerne que les matériaux liés (techniques des mélanges à base de liants hydrauliques ou hydrocarbonés). Lorsque la structure comporte des couches de matériaux non liés (ex : GNT), la dégradation de la chaussée est alors sa déformation rémanente. Les matériaux liés seront assimilés à des corps élastiques alors que les matériaux de type GNT sont à prendre en compte comme des corps (mécaniquement) plastiques.

La détermination de la limite d'endurance peut être étudiée en laboratoire. Cet essai est appelé « détermination de la résistance à la fatigue d'un matériau » (***fig. 11-3***)

fig. 11-3 : machine d'essai permettant de soumettre une éprouvette à des charges répétées pour la détermination de la tenue à la fatigue des matériaux traités





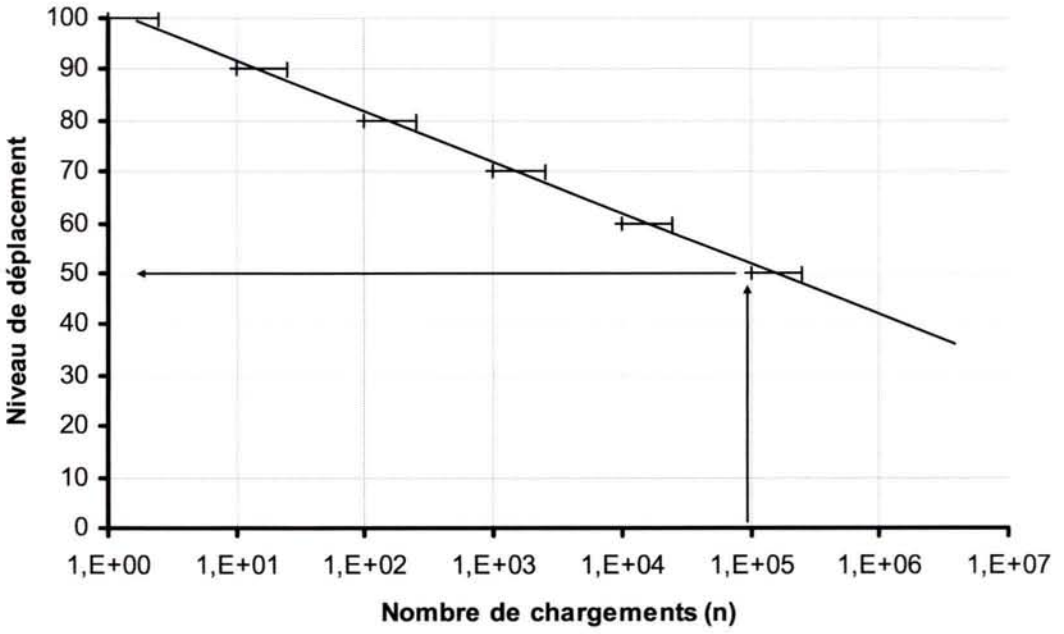
Le principe des essais de fatigue consiste à imposer en tête de l'éprouvette trapézoïdale un déplacement d'un certain niveau. On enregistre la force nécessaire à ces déplacements. On considère que la rupture de l'éprouvette a lieu lorsque la force nécessaire au déplacement est réduite de moitié. On enregistre alors le nombre de

cycles qu'a enduré l'éprouvette. Cet essai est reproduit au moins six fois par niveau pour saisir une moyenne statistique du nombre de cycles associés au niveau. L'essai est reconduit pour différents niveaux.

La régression [niveau de déplacement = f(nombre de chargements ayant conduit à la rupture à ce niveau)] est appelée courbe de fatigue.

Bien entendu, l'exploitation de cette courbe joue à l'inverse pour le « dimensionneur ». Par exemple, sur la figure (***fig.11-4***), on considère un nombre de chargements cumulés de 10^5. Alors, le niveau 50 ne doit pas être dépassé à chaque chargement.

fig. 11-4 : graphique schématique du comportement mécanique à la fatigue des matériaux.



> Quel est le taux de contrainte maximal que peut supporter un élément de structure réalisé avec le matériau testé sachant que le nombre de sollicitations qu'elle devra reprendre est de 100000 ?

> Réponse : <u>à chaque chargement</u> on ne pourra pas dépasser 50 % de la résistance maximale (rupture) du matériau sollicité.

Il s'agit d'un essai très lourd qui nécessite la fabrication d'un très grand nombre de prismes à paramètres très contrôlés (géométrie, composition, échelle).

La droite figurant la relation entre le nombre de chargements et l'effort admissible est la courbe de Wöhler.

*Son tracé s'effectue à partir de mesures expérimentales. Il est difficile à réaliser du fait des dispersions d'essais car les milieux étudiés sont quelque fois, à l'échelle des éprouvettes, hétérogènes, ce qui induit immanquablement des anisotropies. D'autre part, selon leur nature, la réponse des matériaux au protocole d'essai normalisé n'est pas la même [**A-7**].*

Pour les calcaires tendres, des essais de fatigue avaient été conduits lors du chantier de réalisation des couches de fondation de l'autoroute A31 dans sa traversée des Vosges. L'endurance des graves traitées à base de ces calcaires n'avait pas pu être contrôlée, un grand nombre d'éprouvette présentant une rupture précoce inexpliquée lors de l'essai.

Ce comportement n'est pas représentatif du comportement in situ de cette assise qui, 20 après sa mise en service, ne présente pas de signes de sur-fatigue.

Les différentes discussions avec les experts dimensionneurs de mon entreprise et de l'administration m'ont permis de considérer que ces matériaux calcaires doivent être étudiés avec une loi de fatigue identique à celle proposée par le Guide SETRA/LCPC pour les GTLH et les STLH.

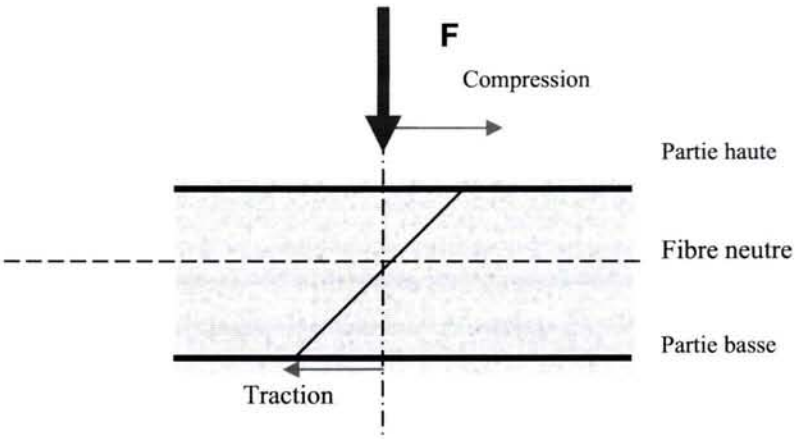
116) SOLLICITATION DE L'ASSISE CALCAIRE TRAITEE DANS LA STRUCTURE : LA TRACTION

Une structure routière soumise à une charge est assimilée à un multicouche déformable. La déformation verticale va induire dans la matière une distribution simultanée de contraintes de compression et de traction (***fig. 11-5***).

fig. 11-5 : position des contraintes dans une couche soumise à de la flexion

(Représentation schématique)

Lorsqu'une couche de chaussée est soumise à une charge (de type localisée), elle fléchit. Cette déformation induit deux types de contraintes dans la couche concernée : en partie haute, une contrainte de compression et en partie basse une contrainte de traction. Les matériaux utilisés dans le domaine de la route et plus particulièrement ceux traités aux liants hydrauliques, ont une nette différence de comportement vis-à-vis de ces deux contraintes. En laboratoire, on note qu'un rapport de l'ordre de 10 sépare les résistances en traction et en compression à la rupture (matériau fragile).



C'est *la résistance en traction qui est déterminante* car elle n'est pas compensée par des armatures, comme dans la technique du béton armé par exemple.

La résistance à la rupture par traction est une donnée nécessaire mais pas suffisante puisque, comme nous venons de l'évoquer, il faut tenir compte d'un niveau d'effort inférieur autorisé pour supporter une répétition de charges (fatigue (***fig.11- 4***)).

Dans le cas des GTLH, la résistance à la traction simple (ou directe [***A-8***], [***A-9***]) à la rupture est d'environ, la moitié de la résistance à la traction par flexion, Ff, (ce qui est la vraie sollicitation subie en bas de couche).

De plus, pour ces matériaux, la donnée σ6 (niveau de contrainte admissible pour 10^6 cycles) est d'environ la moitié de la performance à la rupture au premier chargement.

On peut donc accéder facilement à la donnée σ6 utilisée par les dimensionneurs dans leurs calculs par la connaissance de la résistance en traction directe par la relation :

$$Ff = 2 \times Rt \quad \text{et} \quad \sigma 6 \approx \frac{Ff}{2} \quad \underline{\text{donc}} \quad \sigma 6 \approx Rt$$

C'est la résistance à la traction qui est déterminante car elle n'est pas compensée par des armatures, comme dans la technique des bétons armés par exemple.

117) PRINCIPALES FAMILLES DE STRUCTURES DE CHAUSSEES

Les différents types de corps de chaussées se présentent de la manière suivante [***A-3***] (***tab.11-1***). Ces structures sont celles utilisées en France sur les réseaux routiers et autoroutiers.

tab. 11-1 : familles de structures de chaussées [***A-3***]

- rappel : schéma d'une structure (***fig.11-1***) -

Structures « type »	Nature des couches		
	SURFACE	BASE	FONDATION
Souple	Bitumineuse	Matériaux granulaires	
Bitumineuse épaisse	Matériaux bitumineux		
Semi-rigide	Bitumineuse	Matériaux traités aux liants hydrauliques	
Rigide	Béton de ciment		MTLH
Mixte	Matériaux bitumineux		MTLH
Inverse	Bitumineuse	Graves non traitées	MTLH

1 - 2 LE CONTEXTE ECONOMIQUE DE LA LORRAINE ET SON INFRASTRUCTURE DE TRANSPORT

121) INTRODUCTION

Il nous paraît important de situer géographiquement la région Lorraine dans le contexte économique général. Cette région se trouve au carrefour des grandes régions européennes et elle est directement concernée par les transports. Son infrastructure est donc capitale dans l'économie du pays et de l'Europe puisque qu'elle doit supporter l'activité locale mais aussi beaucoup de fret en transit.

Cette situation n'est pas récente. En effet, d'anciennes cartes montrent que la Lorraine a toujours occupé une place importante dans le dispositif de communication au cœur des différents pays qui bordent la région.

122) SITUATION GEOGRAPHIQUE

La Lorraine se situe dans le quart Nord-est de la France et se compose de quatre départements : Meuse, Moselle, Meurthe-et-Moselle et Vosges (***fig. 12-1***).

fig. 12-1 : carte de la Lorraine et de ses quatre départements

La Lorraine compte une population de 2 310 376 habitants (1999), soit une densité de 98 ha / Km^2.

123) ECONOMIE GENERALE

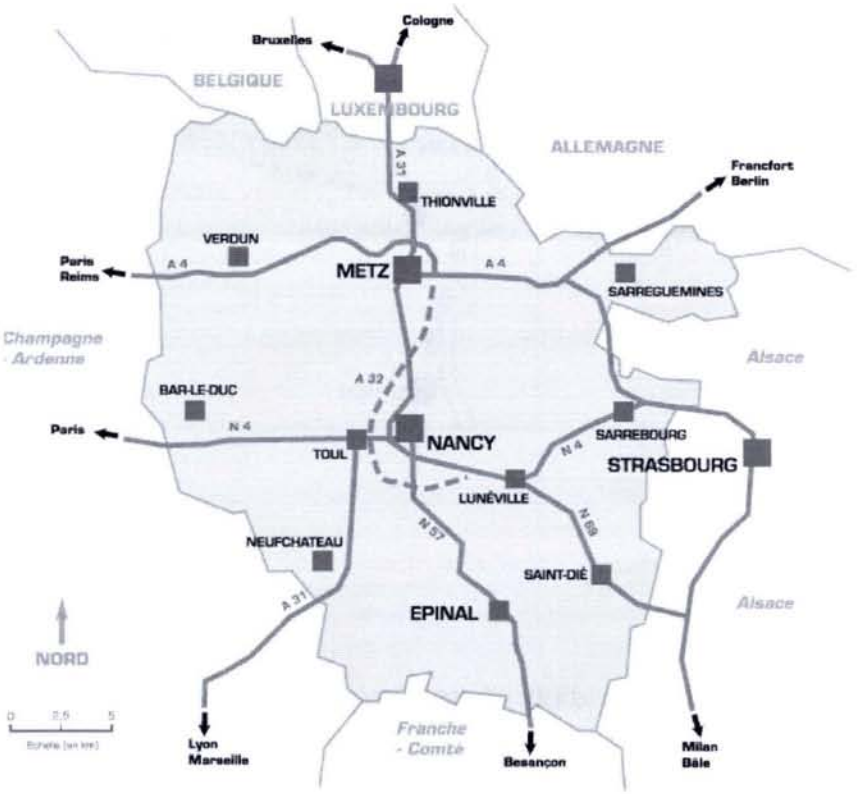
Traditionnellement spécialisée dans l'industrie lourde (sidérurgie, mines de fer, houillères, chimie, textile, etc.), la Lorraine a subi les mutations économiques mondiales. Après de douloureuses restructurations, la région développe actuellement des activités plus diversifiées, valorisant au maximum sa position au cœur des grands axes européens de communication.

124) AXES DE TRANSPORTS

La Lorraine est traversée par deux autoroutes importantes (***fig.12-2***) qui se croisent au nord de Metz. Il s'agit d'ouest en est de l'autoroute A4 Paris / Strasbourg et du nord au sud de l'autoroute A31 Luxembourg / Beaune. Le trafic supporté par cet axe est de type T0 depuis près de 20 ans. Le « doublement » de l'autoroute A31 entre Metz et Nancy *est programmé (A32).*

fig. 12-2 : vue générale du réseau routier lorrain

(Création ADEKWA © – 2004)

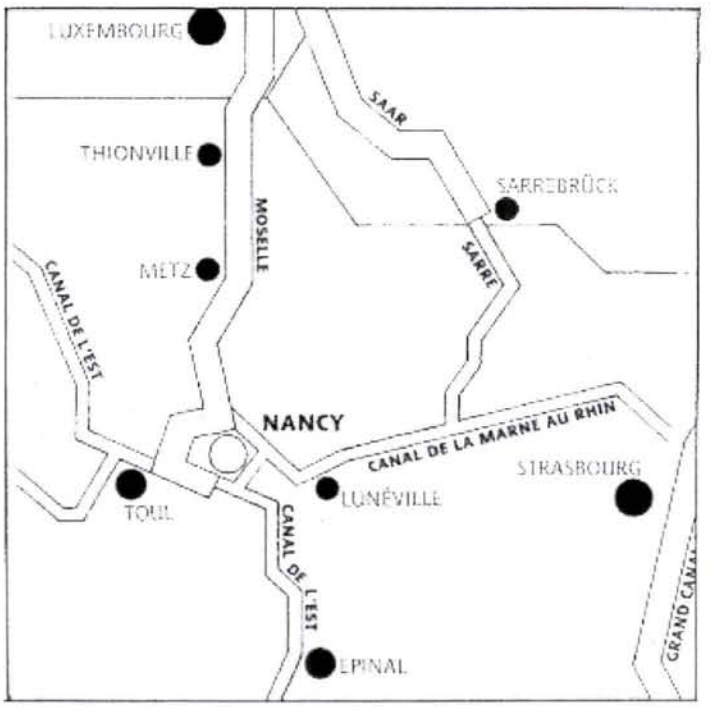


Le réseau routier principal de la Lorraine se compose comme suit [***B-1***] :

- Routes nationales : 1291 Km
- Autoroutes concédées : 269 Km (A4)
- Autoroutes non concédées : 200 Km (A31)

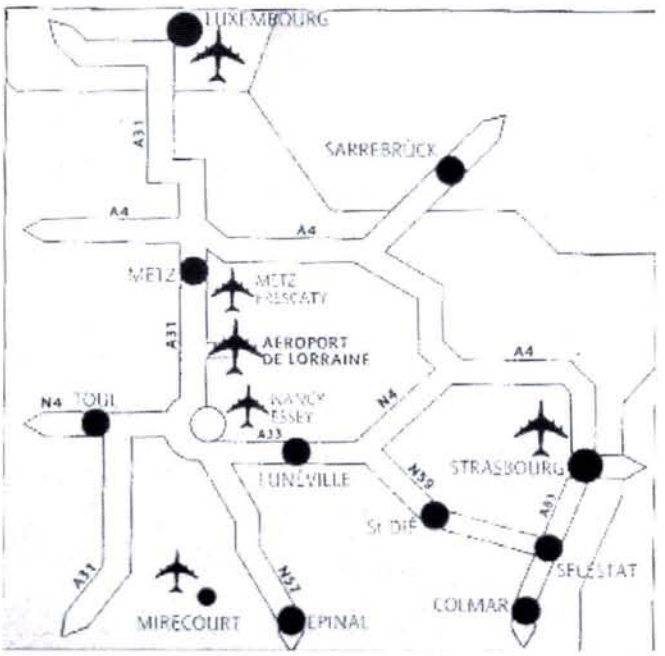
Grâce à la canalisation de la Moselle au gabarit rhénan, la Lorraine possède également une ouverture fluviale sur le Rhin et le réseau de l'Europe Centrale (***fig. 12-3***).

fig. 12-3: vue générale du réseau fluvial lorrain



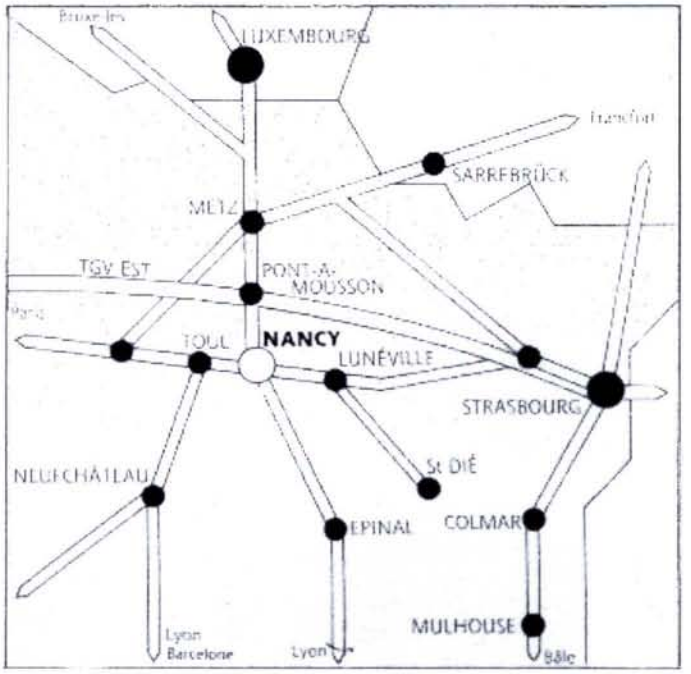
De plus, la Lorraine dispose d'un aéroport régional situé, à mi-chemin, entre Metz et Nancy (***fig.12-4***).

fig.12-4 : positions des points de liaisons aériennes



Enfin, elle va être desservie par un train à grande vitesse, le TGV Est européen, dont les travaux sont en cours (***fig.12-5***).

fig.12-5: vue générale du réseau ferré lorrain



Toutes ces infrastructures, pour leur réalisation et leur entretien, conduisent à l'utilisation de mélanges granulaires où les calcaires peuvent trouver leur place.

1 – 3 LA ROUTE : GRANDE CONSOMMATRICE DE GRANULATS

131) INTRODUCTION

Il est important de rappeler que l'activité routière est très "consommatrice" de granulats.

Les chiffres dont nous disposons à l'échelon national et local (UNPG) datent de 1997 [***C-1***]. De nouvelles données (2001 et 2002) [***C-2***] viennent compléter ce document ci-après qui donne les tendances générales, pour permettre de fixer un ordre de grandeur sur les quantités consommées dans le secteur d'activité de la route.

132) CONSOMMATIONS DE GRANULATS DANS LE BTP NATIONAL ET LORRAIN

Rappelons tout d'abord les quantités mises en jeu dans les différents ouvrages du BTP, telles que publiées dans l'ouvrage "Granulats" de Mrs Arquié et Tourenq [***C-3***]

Bien que assez anciennes, ces valeurs sont toujours valides, car peu sujettes à fluctuations (***tab.13-1***).

tab. 13-1 : consommations élémentaires de granulats par type de construction [***C-3***]

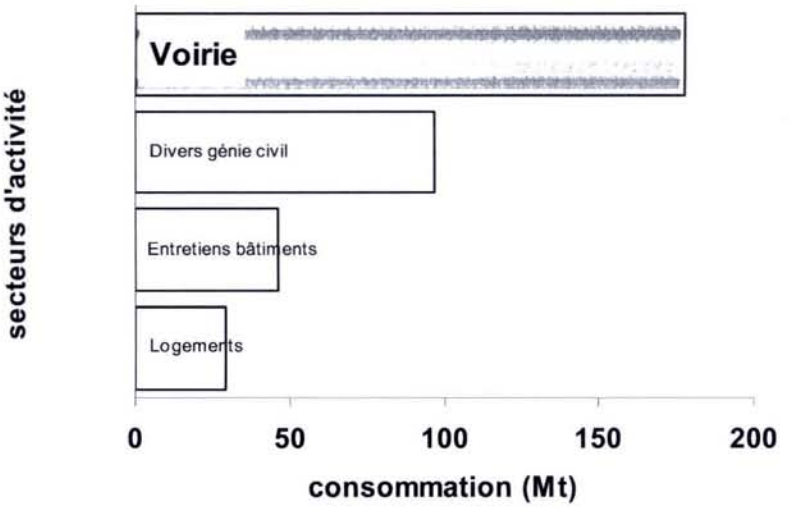
Constructions	Quantité de granulats nécessaire (tonnes)
Logement	120
Hôpital	4800
Lycée	2800
Usine	1700
Hôtel	1100
Magasin	870
1 Km d'autoroute	**30 000**
1 Km de route	**12 000**
1 Km de voie ferrée (2 voies)	16 000
1 centrale nucléaire	6 à 12.10^6

Par ailleurs, en 1997, 350 millions de tonnes de granulats ont été produites en France. La répartition de la consommation est présentée dans le tableau (***tab. 13-2)*** et sur la figure (***fig. 13-1***) où sont mis en relief les valeurs relatives au thème de notre étude.

tab.13-2 : consommation de granulats en France par nature d'ouvrage (UNPG 1997)

	Consommation en millions de tonnes (Mt)	Consommation en pourcentage
1 - Logements neufs	29	8.3
2 - Autres bâtiments et entretien	46	13.1
3 - Divers génie civil	97	27.7
4 - Routes, autoroutes et autres voiries	**178**	**50.9**
Totaux	350	100

fig. 13-1 : consommation de granulats en France (UNPG 1997)



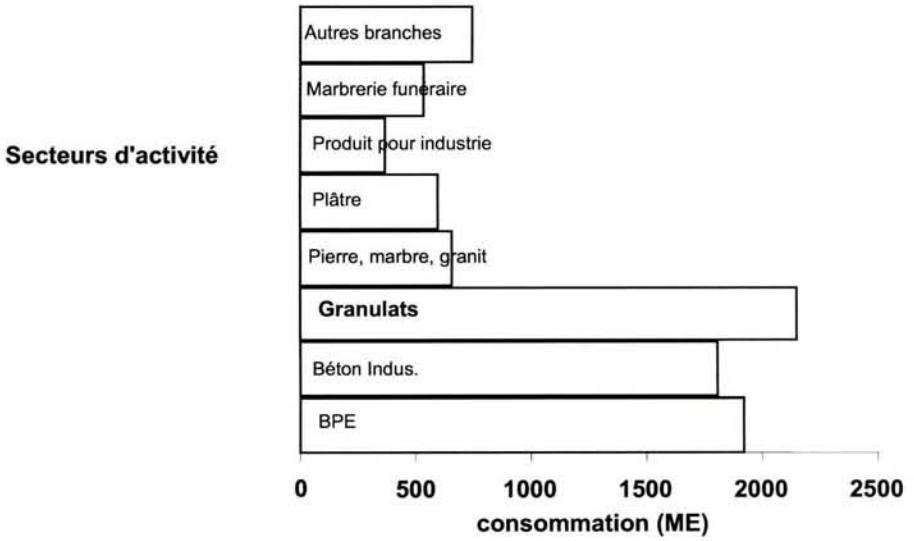
On constate que plus de la moitié des granulats produits en France est destinée aux infrastructures routières du pays.

Ces quelques chiffres montrent bien l'importance du domaine routier dans le BTP. Une étude économique réalisée en 1997 par l'UNICEM Lorraine complète ces données (***tab. 13-3*** et ***fig.13-2***). Elle permet de situer la production des matériaux de construction en termes d'effectif et de chiffre d'affaires. Le résultat de cette enquête est le suivant :

tab. 13-3 : répartition du C.A par branches en 1997 (UNICEM) – Cas de la Lorraine

SECTEURS D'ACTIVITE	Chiffre d'affaires en millions d'euros
1 – Béton prêt à l'emploi	1 918
2 – Béton industriel	1 807
3 – Granulats	**2 148**
4 – Pierre, marbre, granit	656
5 – Plâtre et produits en plâtre	598
6 – Produits pour l'industrie	364
7 – Marbrerie funéraire	536
8 – Autres branches	749
Total	8 777

fig. 13-2 : répartition du chiffre d'affaires par branche en Lorraine (1997)



Le chiffre d'affaires global est de 8777 millions d'Euros avec 2148 millions d'Euros pour le secteur des granulats soit près du quart du C.A. total. Le nombre d'entreprises productrices est d'environ 5000 et l'effectif avoisine 66000 personnes.

En 2002, 400 Mt de granulats ont été consommées en France, dont 82 Mt en béton et 318 en matériaux de génie civil.

Le tableau suivant (tab.13-4) reprend les données nationales de l'UNPG pour les années 2001 et 2002, par nature de roche.

tab. 13-4 : répartition de la production de granulats en 2001 et 2002 (en millions de tonnes) - UNPG

Type de roche	Nature de roche	Production en 2001	Production en 2002
Roche meuble	Alluvionnaires	151	145
	Granulats marins	5	5
	Autres sables	19	18
Roche massive	**Calcaire**	**102**	**99**
	Eruptive	119	116
Recyclage	Schiste	5	4
	Laitiers	5	5
	Matériaux de démolition	9	9
Total		415	401

Les calcaires issus de roches massives représentent le quart de la production des granulats en France. Les roches alluvionnaires peuvent également être à dominante calcaire. Dans ce cas, la production nationale de calcaire destinée à la construction est plus importante encore. Dans le cas de la Lorraine, en se basant sur les données de 1997 de l'UNICEM, le marché des granulats de la Lorraine atteint environ 20 Mt. Le tableau (***tab.13-5***) donne, pour 2001, les chiffres départementaux par nature de granulats.

tab.13-5 : Répartition de la production de granulats par département lorrain et par nature de matériaux (en Kt)

	54	**55**	**57**	**88**	**Lorraine**	**Part par catégorie**
Alluvionnaires	3411	527	827	2006	6771	34,8 %
Laitiers et éruptifs	930	-	3631	1842	6403	33 %
Calcaires	**1546**	**557**	**1899**	**753**	**4755**	**24,5 %**
Divers	250	200	953	100	1503	7,7 %
Totaux	6137	1284	7310	4701	19432	100 %

Un quart de la production de granulats en Lorraine est dorénavant réalisé avec des granulats calcaires (elle n'était que de 12,5 % en 1995). La substitution des granulats alluvionnaires en Lorraine se fait donc progressivement vers les calcaires pour assurer le niveau de consommation en granulats de la région. La route est le plus gros consommateur de granulats et, sans doute, consomme les calcaires en plus grande partie.

Il existe encore des habitudes de consommation par département :

- Les Vosges ne consomment pas de calcaires, mais beaucoup de granulats alluvionnaires et éruptifs.
- La Meurthe-et-Moselle utilise encore beaucoup de matériaux alluvionnaires
- La Moselle dispose toujours d'une importante réserve de laitier et développe l'utilisation de matériaux divers.
- La Meuse consomme en majorité des matériaux calcaires

Pour l'année 2002, le ratio annuel de consommation de granulats par habitant est de 7,14 tonnes en Lorraine (***tab.13-6***). Dix ans auparavant, ce chiffre était de 6,6 tonnes. Rappelons que la moyenne nationale est de 6,07 T/habitant.

Pour les autres activités du BTP, les chiffres de la lorraine sont sensiblement les mêmes qu'au niveau national.

tab.13-6 : Ratios par habitant des diverses productions relatives aux activités du BTP en Lorraine comparés aux références nationales – 2002

	Ratios pour la Lorraine	Ratios nationaux
Logement / habitant (u./1000 h)	3.43	4.62
Ciment / habitant (t/h)	0.30	0.32
B.P.E. / habitant (m^3/h)	0.48	0.51
Béton industriel / habitant (t/h)	0.45	0.45
Granulats / habitant (t/h)	**7.14**	**6.07**

133) MATERIAUX DISPONIBLES EN LORRAINE

Les matériaux qui sont exploités en Lorraine sont de différentes natures. Nous pouvons dégager les principales familles suivantes.

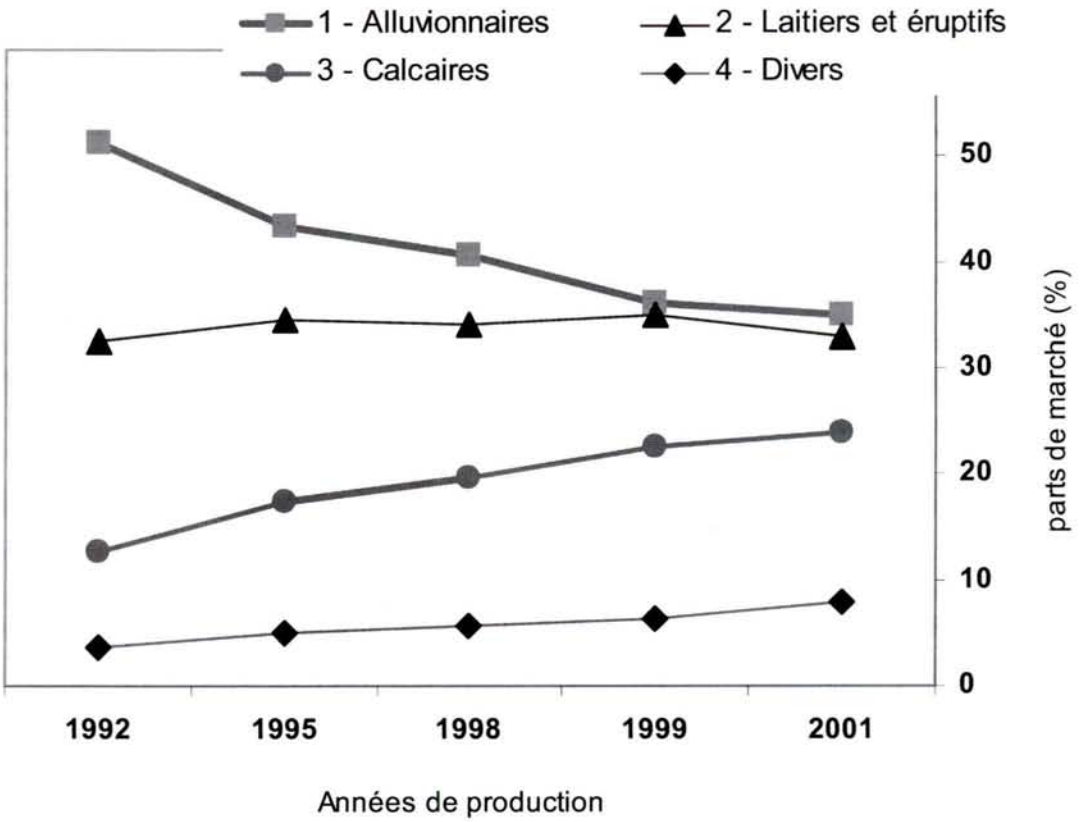
- Les matériaux alluvionnaires,
- Les matériaux éruptifs, les laitiers
- Les matériaux calcaires,
- Les matériaux divers :
  - schistes houillers
  - cendres volantes
  - granulats de bétons recyclés
  - scories d'aciérie électrique et LD
  - sables gréseux
  - granites

Le tableau suivant (***tab. 13-7***) montre la répartition de la production en fonction de la nature des granulats entre les années 1992 et 2001 en KT et en « parts de marché ». Ce dernier paramètre est repris sous forme graphique (***fig. 13-3***).

tab. 13-7 : répartition de la production par nature de granulats en Lorraine entre 1992 et 2001 (Quantités en Kt)

GRANULATS	1992		1995		1998		1999		2001	
	KT	Parts %	KT	Parts %	KT	Parts %	KT	Parts %	KT	Parts %
1 - Alluvionnaires	9670	51,2	7532	43,3	7200	40,4	7068	35,5	6771	34,8
2 - Laitiers et éruptifs	6140	32,5	5998	34,4	6100	34,3	6945	34,9	6403	33,0
3 - Calcaires	**2392**	**12,7**	**3023**	**17,4**	**3500**	**19,7**	**4512**	**22,6**	**4755**	**24,5**
4 - Divers	673	3,6	860	4,9	1000	5,6	1402	7,0	1503	7,7
Total	18875	100	17413	100	17800	100	19927	100	19432	100

fig 13-3: évolution des parts de marché des différentes natures de granulats exploités en Lorraine de 1992 à 2001



On constate que la consommation de laitiers et d'éruptifs est restée quasi-constante. En revanche, en prenant comme année de référence 1992, la production d'alluvionnaires a baissé de 34 % alors que celle des calcaires a augmenté de 88%.

La production moyenne sur cette période étant restée sensiblement la même (environ 19 millions de tonnes/an), on peut donc affirmer que les calcaires et les « autres » granulats compensent la baisse de production d'alluvionnaires de la région lorraine.

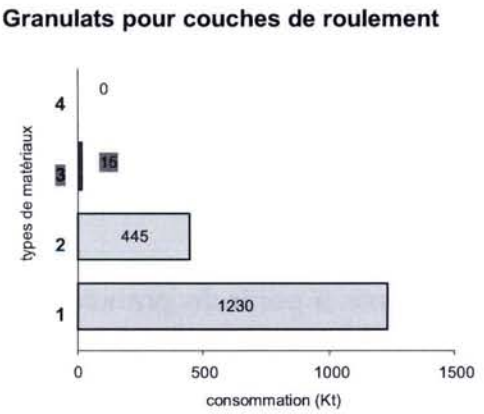
134) CONSOMMATION PAR TYPE D'OUVRAGE EN LORRAINE

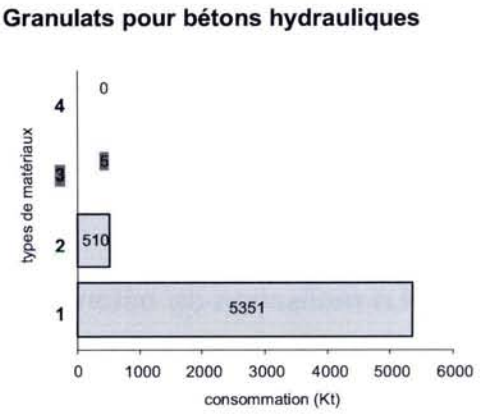
Nous présentons ici l'emploi des différentes natures de granulats dans les différents domaines d'activités de la construction de la Lorraine pour 1997. C'est l'objet du tableau suivant (***tab.13-8***) et des deux graphiques associés (***fig.13-4***). Les données sont issues de l'UNICEM.

tab. 13-8 : Consommations des différentes natures de granulats en fonction du type d'ouvrage (UNICEM 1997).

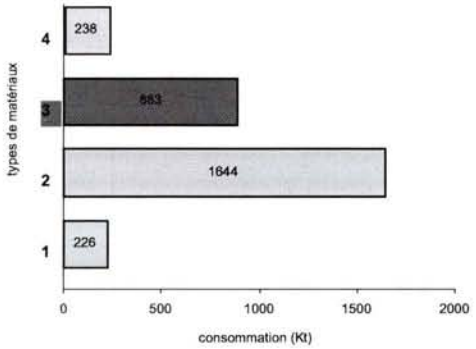
Groupes d'activité	Consommation en kT					Répartition de l'activité (%)
	Type d'ouvrage	**1 - Alluvionnaires**	**2 - Eruptifs et laitiers**	**3 - Calcaires**	**4 - Divers**	
A	**Béton hydraulique**	5351	510	**5**	0	35
	Couche de roulement	1230	445	**15**	0	10
	Assises de chaussées	339	1490	**518**	97	14
B	**Couche de forme**	226	1644	**883**	238	18
	Remblais	85	330	**1064**	207	10
	Divers	226	1154	**518**	348	13

fig 13-4 : présentation graphique des consommations des diverses natures de granulats en fonction du type d'ouvrage.

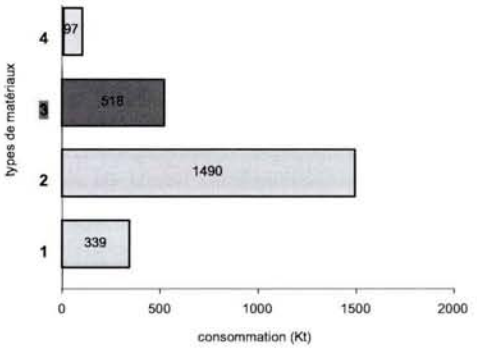




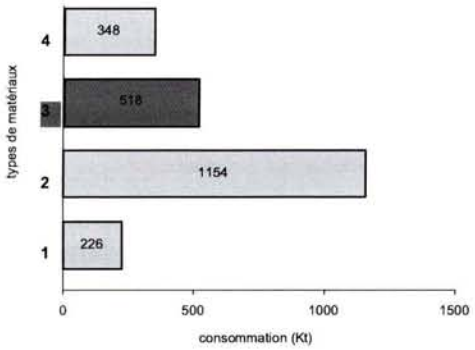
Matériaux pour couches de forme



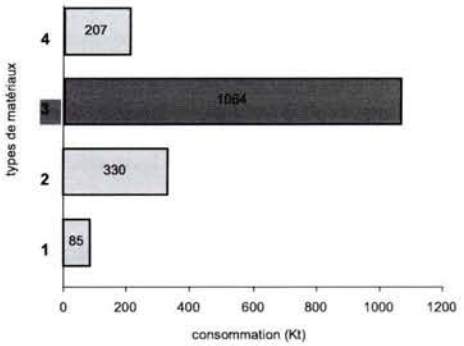
Granulats pour assises de chaussées



Granulats pour utilisations diverses



Matériaux pour remblais



- Le groupe d'activité "A" représente les secteurs nécessitant des granulats à "caractéristiques performantielles élevées". Pour ma part, je préférerais l'utilisation du qualificatif "adapté", car la résistance demandée des matériaux n'est pas la même selon les utilisations.

- Le groupe "B", correspond à des activités dont les besoins sont couverts par des "granulats peu élaborés".

La réalisation de bétons hydrauliques de qualité courante à partir de granulats calcaires a été démontrée mais elle est encore peu développée. En effet, à ma connaissance, différents laboratoires en Lorraine [***C-4***], [***C-5***] sont parvenus à élaborer des mélanges dont le couple formulation / performance est maîtrisé. De plus, l'apparition de nouveaux concepts de formulation de béton [***C-7***] a pu être testée avec succès sur des mélanges à base de granulats calcaires du bajocien de la région de Nancy et de Neufchâteau.

Les premières utilisations de bétons calcaires en VRD commencent à voir le jour, mais certaines adaptations seront probablement nécessaires, tant au niveau des matériels d'application que de la formation des hommes. Sur chantier, on remarque que l'aspect et le comportement « rhéologique » des mélanges calcaires diffèrent de ceux des bétons traditionnels (couleur, maniabilité) bien que les essais de contrôle attestent que les performances sont respectées. Certaines "habitudes" doivent donc évoluer.

Les calcaires lorrains ne trouvent pas leur place en couche de roulement car les caractéristiques intrinsèques (Los Angeles et MDE) ne sont pas suffisantes. Le CPA (coefficient de polissage accéléré) qui peut approcher la valeur favorable de 0.50 pour certaines nuances de calcaires du Bajocien lorrain, ne peut compenser les deux autres critères énoncés précédemment.

Les assises de chaussées sont les plus grandes consommatrices de granulats en raison des épaisseurs mise en œuvre. Ces épaisseurs sont nécessaires pour des raisons mécaniques (supporter des charges) mais aussi, dans notre région, pour assurer la protection au gel de la base de la structure qui nécessite quelque fois d'ajuster les épaisseurs de la couche de fondation et de la couche de forme pour éloigner l'arase du terrassement gélive de la surface libre de la chaussée.

Les calcaires lorrains trouvent donc ici leur utilisation la plus aboutie. Moyennant une étude adaptée en laboratoire, on parvient en général à proposer des solutions performantes.

Il existe dans notre région plusieurs ouvrages de références : le plus important est celui de la chaussée de l'autoroute A31, au sud de Toul, dont la couche de fondation est une grave-laitier à base de calcaires extraits des affleurements proches du tracé. L'autoroute a été initialement calculée en T2 / PF2. En réalité, elle a été réalisée en T0/PF4. Après son ouverture en 1984, le trafic a rapidement atteint T0 sans que cela provoque jusqu'à présent des défauts de structure liés à la fatigue de l'ouvrage. Pourtant, le calcaire qui a été choisi (carrière d'Harmonville – calcaire oolitique) avait la particularité d'être sensible au gel (IG # 70), comme le précise les auteurs de l'article "Emploi des calcaires en limite de spécification" [***C-6***].

Sur la base d'une étude adaptée, le laboratoire Régional des Ponts et Chaussées, pour le compte de SCETAUROUTE, a validé le concept suivant :

Granulats donnés + formulation adaptée = grave-laitier normale

(« Qui présente des caractéristiques normales »)

Cette "égalité" résume à elle seule la démarche que nous devons adopter lorsque nous sommes confrontés à des matériaux "non traditionnels".

Pour mémoire, on peut rappeler quelques chiffres concernant le chantier de l'A31 ainsi que les techniques mises en œuvre :

Le tronçon concerné est celui qui relie Dijon à Nancy sur 180 Km environ. Sur les 15 millions de tonnes de granulats qui ont été nécessaires à la chaussée, 5 millions de tonnes devaient être mis en œuvre dans des secteurs où il n'existait pas de ressources aux propriétés satisfaisantes. Après prospection et étude en laboratoire, la formulation de la grave-laitier à partir des matériaux du site d'Harmonville s'est révélée adaptée,non gélive à court terme et développait une résistance à la traction directe (Rt) de 1,22 MPa à 90 jours pour un module de 24000 MPa.

Le bilan de cet important chantier est une économie substantielle évaluée à 10 ans de production d'une ballastière de taille moyenne. Au terme de près de 20 années d'utilisation, et pour avoir personnellement pu effectuer des sondages sur la totalité de la structure (travaux réalisés dans le cadre de mon activité professionnelle) on peut affirmer que ce chantier est une réussite exemplaire en matière d'économie de matériaux nobles.

135) CONCLUSION

Les études de l'UNICEM dont nous avons repris certains éléments montrent que la substitution des matériaux traditionnels n'est plus une hypothèse mais bien une réalité. On pourra toutefois noter que sur certains chantiers, des remblais de fouilles s'effectuent encore avec des matériaux alluvionnaires ce qui est extrêmement dommageable.

Cette synthèse sous entend que l'épuisement des réserves est inéluctable. Si l'on veut alors éviter l'importation de matériaux par la route ou par voies d'eau ou ferrées, il convient de valoriser au mieux le potentiel existant. Il faut donc engager ou conforter des études de valorisation des calcaires lorrains dans la construction routière notamment, en respectant l'esprit de la directive européenne sur l'aptitude d'usage des produits de construction. Rappelons que cette directive stipule que la conception des ouvrages doit répondre à 6 exigences essentielles [***C-7***] :

1. **performance et stabilité**
2. **sécurité d'utilisation**
3. protection contre le bruit
4. **hygiène, santé et environnement**
5. sécurité en cas d'incendie
6. **économie d'énergie**

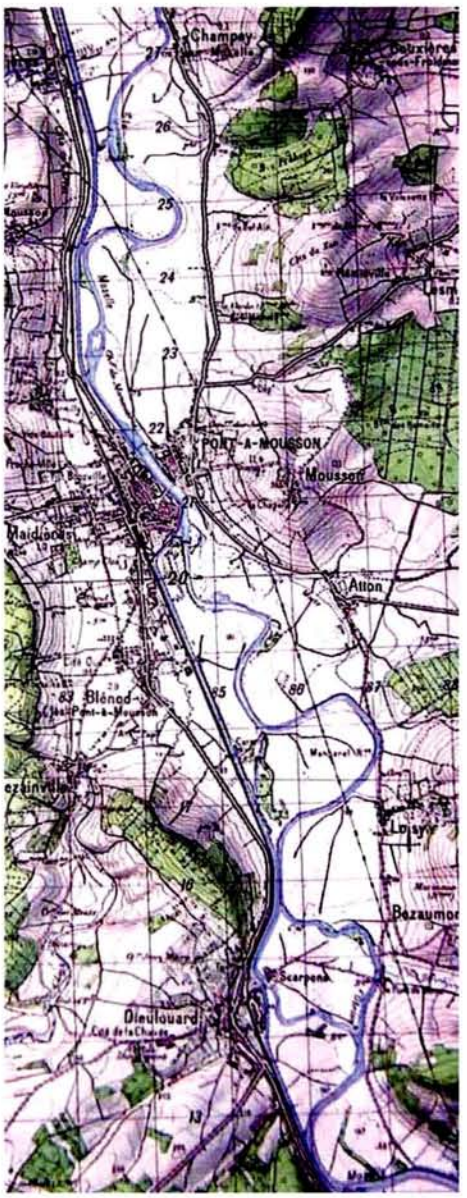
1 – 4 SUBSTITUTION DES RESSOURCES ALLUVIONNAIRES

141) INTRODUCTION

Pour illustrer la problématique de la ressource en granulats de type alluvionnaire, comparons par exemple les éditions 1956 et 1987 de la carte IGN de la région de Pont-à-Mousson (***fig.14-1***). Elles montrent bien l'évolution de l'urbanisation, concomitamment à celle de la consommation des ressources granulaires de la Moselle [***D-1***].

fig. 14-1 : Evolution de l'environnement de la vallée de la Moselle dans la région de Pont-à-Mousson après 30 ans d'exploitation des granulats alluvionnaires.
Reproduction de la carte IGN 150000 (feuille NI-14) partie Est. Editions de 1956 et de 1987

1956 **1987**



Pour pallier cette situation, deux solutions d'approvisionnement en granulats de substitution sont possibles :

- Importer d'autres régions les matériaux traditionnels. Dans ce cas, il faut prendre en compte les plus values relatives à leur transport et aux impacts sur l'environnement (transports,...).
- Exploiter les matériaux locaux (au sens où ils sont proches des zones d'utilisation) : il s'agit principalement, en Lorraine, des calcaires dont les affleurements suivent la vallée de la Moselle. D'autres matériaux, tels les laitiers d'aciéries, les MIOM, les matériaux de démolition, etc. peuvent également être utilisés.

Mais, pour répondre aux diverses exigences des produits, l'exploitation de ces ressources de substitution doit de toute évidence, être encore plus sélective que pour les matériaux traditionnels.

D'ailleurs, la classification proposée par l'UNICEM, entre la nature des matériaux et leurs types d'utilisation, (A ou B), va dans ce sens (cf. tableau 13-13)

142) ACTIONS ET POLITIQUES ENGAGEES ou ENVISAGEES

Qu'ils soient Politiques, Concepteurs, Universitaires ou bien Entrepreneurs, les discours des acteurs du secteur du BTP en Lorraine convergent tous vers le constat qu'il faut économiser les matériaux alluvionnaires.

Nous faisons ici état de quelques déclarations et actions qui montrent qu'il existe une véritable volonté de réussir à juguler la pénurie annoncée des alluvionnaires.

Le 5 mai 1975, un décret national instaure la « Taxe parafiscale » sur les granulats [***D-2***]. Le bénéfice tiré de cette mesure est destiné à financer des travaux de recherche liés aux analyses de la demande et de l'offre en granulats de régions jugées « vulnérables ». Ces démarches sont certainement motivées par les observations antérieures sur l'évolution de la consommation des matériaux dans le domaine du BTP en général. Ainsi trouve-t-on dans la littérature des articles comme celui de L. Primel [***D-***

3] qui fait état, dans son introduction, que ... « *tel matériau aujourd'hui dédaigné sera certainement largement utilisé demain* »

1982 : un rapport de synthèse, émanant du Conseil Général des Ponts et Chaussées, fait suite aux résultats du groupe de travail « L'extraction et la production des granulats » (en partenariat avec le Ministère de l'Industrie et le Conseil Général des Mines). Il ressortait de ce document qu'il était important de s'intéresser aux matériaux de substitution. Dans la foulée, a été créé un programme ambitieux : le programme MATERLOC (projet national de recherche et de développement en génie civil n°9) avec sa déclinaison (bien connue dans notre région) : MATERLOC CALCAIRES.

On trouve également des références d'expérience réussie à l'étranger, comme le rapporte V.M. Jumashev et C. Tourenq dans leur article sur l'utilisation de granulats tendres (Rc max ≈20 MPa ...) pour des chaussées en URSS [***D-4***]. Dans un second article [***D-5***], Tourenq cite Nekrasov : « Tout granulat peut trouver utilisation en construction routière à condition d'en prévoir correctement l'emploi » (1964).

En Lorraine, la situation est pour le moins étrange. Nous disposons de beaucoup de données, les calcaires sont utilisés dans un nombre grandissant de cas, des synthèses de travaux ont été tentées [***D-6***], des « intentions » sont régulièrement à l'ordre du jour, **mais le Guide technique d'emploi des matériaux calcaires en Lorraine reste à faire**. A ma connaissance, seule la constitution de groupes de travail a été initiée il y a quelques années [***D-7***] et une synthèse de travaux a été réalisée à l'UNPG en 1992, pour la Meurthe-et-Moselle [***D-8***]. En 1996, M. Chaumont (Directeur du CETE de l'Est) exposait la nécessité « *d'engager des processus de mise au point de premiers guides techniques régionaux d'emploi de matériaux locaux, le SETRA ayant donné son accord pour engager ces processus,...* » [***D-9***].

143) CONCLUSION

Les granulats de substitution existent et, comme on le verra plus loin, les performances des mélanges à base de ces produits sont de mieux en mieux connues. Il manque encore la validation « scientifique » de chantiers de référence (ou le suivi rigoureux des ouvrages existants et en service) réalisés avec ces « nouveaux » produits pour qu'ils prennent un meilleur essor.

L'avenir du BTP et de la région est au prix d'une approche pragmatique de la conception des ouvrages. Cette démarche est typiquement celle qui a été appliquée par le passé pour le réseau routier français, où les règles établies ne sont finalement que le résultat de modèles théoriques calés sur la vérification, in situ, des diverses hypothèses de départ.

Le suivi dans le temps des ouvrages en service est donc la seule vérification (à mon sens) qui permet de valider des modèles, dans un contexte de fourniture de granulats donné.

La réalisation d'un guide technique régional (lorrain) est l'outil nécessaire pour progresser dans cette voie. Même si le document n'est pas parfait, il pourra être complété lors de ses mises à jour.

Comme l'a rappelé Pierre DUPONT du SETRA [***D-10***], « *pour cerner les possibilités d'emploi des granulats hors spécifications, les guides techniques régionaux constituent une véritable base méthodologique et doivent nous renseigner sérieusement sur plusieurs points dont les chantiers de références ayant permis de définir la dérogation* ».

Actuellement, pour la Lorraine, nous ne disposons pas d'un tel document de référence. On est donc contraint de se référer aux documents généraux (Guide Technique [***D-11***], et Guide d'Application [***D-12***]). Ces guides ouvrent, malgré tout, la possibilité d'étudier des solutions *confortatoires* permettant de compenser les performances plus faibles de certains granulats.

1 – 5 CADRE NORMATIF ACTUEL

151) PRESENTATION

1511) Textes officiels

Les caractéristiques techniques des matériaux et produits sont normalisées. Les méthodes de calculs sont décrites dans un guide technique. L'Etat (via la Direction des Routes) a édité des directives et des documents d'application qui présentent les choix de ce Maître d'Ouvrage.

Les calculs de structures sont conduits avec des résistances de matériaux conventionnelles. Les études de convenance en laboratoire doivent démontrer l'appartenance à une classe mécanique conforme à celle choisie pour le matériau dans les calculs. De plus, la structure doit être analysée dans sa capacité isolante si le sol support est considéré comme gélif.

1512) La normalisation dans le domaine routier

Dans cette partie du mémoire, nous allons nous pencher sur les règles (souvent normatives) qui définissent plusieurs paramètres concernant les produits utilisés (classification et mise en œuvre).

En revanche, la partie concernant l'étude en laboratoire des matériaux destinés aux assises routières (essais et méthodologies d'études) sera traitée ultérieurement. Les références bibliographiques – essentiellement normatives – y seront alors rappelées.

On peut expliquer de manière très schématique l'état de ce qu'il est convenu d'appeler « la normalisation dans le domaine routier », qui est un domaine assez spécifique. Pour cela, nous allons tout d'abord définir plusieurs termes importants qui sont des thèmes génériques pouvant avoir des domaines d'applications soit en phase d'élaboration des matériaux soit en phase de transformation de ces derniers.

- Les matières premières : il s'agit de tous les matériaux, liants, ajouts, etc. entrant dans la constitution de l'ouvrage final, qu'ils soient utilisés avec ou sans transformation.

- Les produits : ce sont les matières premières qui ont subi une transformation. On parle de produits lorsque nous évoquons les GNT, les MTLH et les matériaux traités aux liants

hydrocarbonés.

- L'élaboration des produits : deux domaines sont concernés. Celui de l'élaboration des matières premières (granulats, liants hydrauliques et hydrocarbonés, ajouts, etc.), mais également celui concernant l'élaboration de produits tels que les MTLH en centrales de malaxage, etc.

- Les études et la mise en œuvre : nous avons volontairement regroupé ces deux domaines car ils définissent les conditions d'utilisation des produits, que ce soit en laboratoire, par l'intermédiaire des normes d'essais ou méthodologiques d'études, ou bien sur chantier où, cette fois, elles définissent les « règles de l'art », ces normes « fixent » le contexte, les conditions de travail, le matériel, etc..

- Les contrôles : les textes indépendants ou faisant partie intégrante des divers documents évoqués ci-avant, montrent quelles sont les méthodes à mettre en œuvre pour s'assurer que les mesures, les règles de l'art, etc. soient respectées avec un seul objectif : la qualité *envisagée* de l'ouvrage final.

Nous allons nous attacher dans cette partie à la normalisation, relative aux sujets suivants :

- La normalisation relative aux granulats
- La normalisation des produits de type GNT et MTLH
- La normalisation relative à l'emploi de certains produits

Enfin, nous ferons un examen critique du Guide d'application des normes pour le réseau national. Ce texte est important pour le contexte de notre étude, car c'est le seul document qui ouvre la porte aux matériaux « hors normes », « sub-normaux », « tendres » etc. auxquels nous pouvons être confrontés dans des cadres aussi divers que le réemploi de matériaux de site, les conditions économiques d'une région ou tout autre contexte pratique.

1513) La normalisation européenne

Alors que nous rédigeons ces lignes, la normalisation européenne est en cours d'application à tout le territoire européen. Depuis quelques mois, nous observons un nombre grandissant de publications normatives « unificatrices » relatives à notre domaine d'activité. La date d'application des méthodes d'essais « granulats » est fixée pour le premier juin 2004. Les méthodes employées pour l'analyse de certaines caractéristiques des matériaux dans ce mémoire n'auront alors plus cours.

Quoi qu'il en soit, et parce que nous avons mis en place depuis près d'une année des programmes d'études comparatives, nous pouvons dire que les valeurs ci-après annoncées, en terme de coefficients Los Angeles, MDE et granularité, ne sont pas, en valeur absolue, très différentes des méthodes d'essai pratiquées actuellement en France.

De plus, il peut régner actuellement une certaine confusion concernant les textes eux-mêmes. En effet :

- les méthodes d'essai sur granulats, ainsi que les normes relatives à leur classification (prochaine parution de la norme Granulats XP P 18-545 et parution en août 2003 de la norme EN 13242 – P 18-242- qui est destinée à remplacer *partiellement* la XP P 18-540 ...), sont d'actualité

- les normes relatives aux produits couramment employés dans les chaussées que sont les GNT, les MTLH et les mélanges traités aux liants hydrocarbonés, ne sont pas encore en phase d'application.

Même si l'application <u>réelle</u> des premiers textes s'effectue à partir du premier juin 2004, il y aura inévitablement une période «transitoire» durant laquelle il conviendra de préciser la norme d'essai, de classification et de produit qui a été appliquée.

Pour ce qui concerne notre travail, les normes d'essai, classifications, méthodologies et produits sont celles d'application légale sur le territoire français avant juin 2004.

152) NORMALISATION DES GRANULATS

En France, dans le cadre des techniques routières, la réalisation d'un "produit" (couche de structure routière, plate-forme, couche de roulement, etc.) nécessite la prise ne compte des caractéristiques des matériaux constituant le produit envisagé. La norme XP P 18-540 [***E-1***] qualifie un matériau (ou granulat) en fonction de deux types de paramètres :

- ses caractéristiques **intrinsèques**
- ses caractéristiques de **fabrication**.

En fonction du domaine d'emploi du matériau, le nombre de paramètres à maîtriser dans l'une ou l'autre des caractéristiques est spécifié.

1521) La norme XP P 18-540

La norme française « granulats » XP 18-540 d'octobre 1997 a la particularité de se décliner en *articles* relatifs à des domaines précis d'emploi des matériaux :

- ***Article 7 : Chaussées – Couches de base, de liaison et de fondation***
- Article 8 : Chaussées – Couches de roulement
- Article 9 : Chaussées – Bétons de ciment
- Article 10 : Bétons hydrauliques

Elle est un pivot incontournable pour notre étude. J'aurai l'occasion de m'y référer régulièrement. Ce document officiel est essentiel. Des liens référentiels ont été établis vers d'autres textes (normes, guides techniques).

En ce qui nous concerne, nous nous intéresserons principalement à **l'article 7** de ce document (granulats pour couches de base, de liaison et de fondation).

La dénomination « fabrication » est directement liée au fait que ces caractéristiques sont maîtrisables par le procédé d'élaboration du granulat. On parle alors des caractéristiques ayant trait à la géométrie et à la propreté du granulat.

Elle concerne :

- La granularité qui permet de vérifier la conformité de l'appellation de la coupure en terme de d/D ou 0/D.

- L'aplatissement qui est le facteur de forme exprimant le pourcentage de grains de rapport géométrique Epaisseur / Grosseur égal à 1,58. Ce coefficient est un élément géométrique caractéristique du mode d'élaboration du granulats (choix du matériel de concassage, cribles). La nature pétrographique (qui est par définition une caractéristique intrinsèque) a une influence évidente quant à la forme du matériau en sortie de concasseur. Mais le choix d'un matériel *adapté* permet aujourd'hui de bien contrôler ce paramètre. Evidemment, la « forme » (au sens de l'aplatissement) est tributaire de deux paramètres : un rapport de concassage convenable, si possible élevé, et la prise en compte de la notion de réelle élaboration (la création de matériaux pour GNT A, par exemple, échappe à cette possibilité industrielle).

- La propreté, mesurée le plus souvent par la valeur de bleu de méthylène, est une qualité essentielle pour les granulats de construction. C'est également un point sur lequel le process de fabrication peut intervenir. Diverses actions (éventuellement conjuguées) permettent d'obtenir des granulats de qualité en fonction de ce critère : scalpage efficace, lavage, extraction et concassage/criblage par météo favorable, cadences adaptées, cribles en bon état, stockage des produits maîtrisés, engins de reprise et de transport propres, etc.

Les caractéristiques intrinsèques sont, par définition, les propriétés acquises des matériaux et non modifiables par les divers procédés d'élaboration mis en œuvre. Elles sont le résultat de la nature, de la formation et du « vécu » de la roche mère

- minéralogie, métamorphisme, altération, etc.

- ou du produit de base pour les co-produits industriels, matériaux recyclés.

Les caractéristiques qui nous intéressent (d'un point de vue strictement normatif) sont :

- les performances mécaniques
- la masse volumique réelle (MVR) et le coefficient d'absorption d'eau (Ab)
- la résistance aux cycles de gel/dégel

Les caractéristiques mécaniques intrinsèques des granulats sont actuellement celles appréciées par les essais Los Angeles et d'usure micro-Deval en présence d'eau.

La norme XP 18-540, au paragraphe 7.1 (caractéristiques intrinsèques des gravillons et de la fraction gravillon des graves) précise les valeurs suivantes (***tab.15-1***), rappelées ici car elles sont fréquemment utilisées dans ce travail.

tab. 15-1 : Caractéristiques intrinsèques des gravillons - Suivant XP 18-540 § 7.1

Catégories	LA + MDE	et	LA	et	MDE
	Vss				
B	35	et	25	et	20
C	45		30		25
D	55		35		30
E	80		45		45
F	Pas de spécifications mais FPT renseignée				

- La catégorie *A* n'apparaît pas dans ce tableau : pour les utilisations concernées dans ce chapitre, employer ce type de granulats serait un gâchis manifeste. Les matériaux A sont à réserver pour d'autres réalisations telles que les couches de roulement à base de liants hydrocarbonés (enrobés ou enduits superficiels). Les matériaux A sont généralement des granulats qui présentent d'excellentes caractéristiques mécaniques vis-à-vis de la résistance aux chocs et à l'attrition mais également un très fort CPA.
- Les matériaux de catégorie B sont également utilisables pour des applications du domaine des couches de roulement mais on peut trouver, dans cette catégorie, des granulats dont le CPA est (relativement) faible, rendant de fait leur emploi en couche de surface inappropriée.

S.C.D. - U.H.P. NANCY 1
BIBLIOTHÈQUE DES SCIENCES
Rue du Jardin Botanique - BP 11
54601 VILLERS-LES-NANCY Cédex

- De la catégorie C à la catégorie E, nous trouvons la majorité des matériaux utilisés en structure. Ces classes englobent également une bonne partie des matériaux calcaires de la région lorraine.
- Enfin, la catégorie F est la limite de la classification proposée. Elle concerne tous les granulats très tendres.

153) UTILISATION DES GRANULATS

1531) Recommandations des normes produits

Notre champ général d'étude concerne l'utilisation de granulats pour la réalisation de couches de structures en STLH, GTLH ou GNT. Ces *produits* sont également appelés mélanges non traités ou traités aux liants hydrauliques.

Ces techniques routières font l'objet de textes normatifs qui fixent les spécifications des matériaux constitutifs. Elles sont reportées dans le tableau (***tab. 15-2***).

tab.15-2 : Caractéristiques normatives des granulats en fonction des techniques routières

TECHNIQUES ROUTIERES [suivant les normes produits correspondantes]	**CATEGORIE DES GRANULATS**	
	GRAVILLONS	**SABLES**
GTLH [*E-2*]	D à E	b à c
BETON COMPACTE [*E-3*]	D à E	b à c
GNT [*E-4*]	C à F	a à c
STLH (*) [*E-5*]	/	PR selon VBS

(*) Nous avons ajouté dans ce tableau la technique des sables traités aux liants hydrauliques. Bien que cette dernière ne fasse pas état de contraintes quant aux caractéristiques géomécaniques de la roche il nous est apparu que cet ajout permettait de balayer utilement l'ensemble des techniques routières de structure.

Il apparaît que les granulats de catégorie F ne peuvent être utilisés que dans les GNT et qu'ils sont exclus des produits à base de traitement aux liants hydrauliques. Les sables ne sont pas concernés par des seuils mécaniques. Seule leur propreté est déterminante pour les différencier.

1532) Recommandations du guide d'application des normes

Au même titre que les techniques utilisant les traitements aux liants hydrocarbonés, le SETRA (Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes) et le LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) ont édité un document technique [***E-6***] précisant les « conditions d'utilisation des GNT et MTLH en assises de chaussées pour le réseau national français non concédé ».

La prise en compte de ce document me semble important car les données qu'il contient seront essentielles. Par rapport aux normes « produits », des aménagements sont précisés en fonction de deux critères : la position dans la structure et la classe de trafic envisagée.

Les classes de trafic sont rappelées dans le tableau suivant (***tab. 15-2***), en fonction du trafic poids lourds journalier moyen ou PLMJA (un poids lourd est un véhicule de PTAC ≥ 3,5 t) de la voie la plus chargée de la chaussée.

tab.15-2 : classes de trafic [***E-6***]

Classe de trafic	T5	T4	T3	T2	T1	T0	TS	TEX
Seuils de trafic (PL MJA/sens)			85	200	500	1200	3000	
Limite MJA		25	50	150	300	750	2000	5000

Les 3 tableaux suivants, extraits du guide d'application des normes [***E-6***], rappellent les spécifications d'emploi des granulats dans les assises de chaussées en GNT, en GTLH et en STLH.

tab.15-3 : spécification des granulats pour un emploi en GNT dans les assises de chaussées [***E-6***]

Usage	Caractéristiques	Classes de Trafic					
		T5	T4	T3	T2	TI	≥TO
Fondation	Granularité	0/63 0/31,5 0/20		0/31,5 0/20		0/20	
	Résistance mécanique des gravillons	E		D	C		Non admis
	Caractéristiques de fabrication des gravillons	IV		III			
	Caractéristiques de fabrication des sables	c	b				
	Angularité des gravillons et des sables	Ic > 30 (**)		Ic>30	Ic>60	Ic = 100	
Base	Granularité	0/31,5 0/20		0/20 0/14	Non admis		
	Résistance mécanique des gravillons	E	D (***)	C (***)			
	Caractéristiques de fabrication des gravillons	Ic > 30		Ic>60			
	Caractéristiques de fabrication des sables	b					
	Angularité des gravillons et des sables	Ic > 30		Ic > 60			
Structure inverse	Granularité	Non admis		0-14			
	Résistance mécanique des gravillons			C			
	Caractéristiques de fabrication des gravillons			III			
	Caractéristiques de fabrication des sables			b			
	Angularité des gravillons et des sables			Ic = 100			

(*) Les graves non traitées ne peuvent être employées en fondation pour des trafics T1 que sur une plate-forme de classe de portance ≥ PF2

(**) Pour les trafics T4 et T5 en fondation, on peut admettre des granulats d'angularité < 30 sous réserve que les graves non traitées restent, aux épaisseurs de mise en oeuvre, traficables et compactables.

(***) Dans le cas où la GNT est caractérisée par l'essai triaxial à chargements répétés, les granulats pourront être de classe de résistance mécanique E pour un trafic T4 et D pour un trafic T3.

tab.15-4 : spécification des granulats pour un emploi en GTLH dans les assises de chaussées [***E-6***]

Usage	**Caractéristiques**	**Classe de Trafic**				
		< T3	T3	T2	TI	>TO
Fondation	Granularité (mm)	0/14 ou 0/20				
	Résistance mécanique des gravillons	E			D	
	Caractéristiques de fabrication des gravillons	III				
	Caractéristiques de fabrication des sables	b				
	Angularité des gravillons et des sables	Ic ≥ 30				
Base	Granularité (mm)	0/14 ou 0/20				
	Résistance mécanique des gravillons	E	D			
	Caractéristiques de fabrication des gravillons	III				
	Caractéristiques de fabrication des sables	b				
	Angularité des gravillons et des sables	Renforcement sous circulation				
		Ic ≥ 30		Ic ≥ 60	Ic = 100	
		Base de chaussée neuve (ou fondation de chaussée en béton)				
		Ic ≥ 30			Ic ≥ 60	Ic = 100

tab.15-5 : spécification des granulats pour un emploi en STLH dans les assises de chaussées [***E-6***]

Usage	Caractéristiques	Classe de Trafic				
		< T3	T3	T2	T1	> TO
Fondation	Granularité	sables grossiers, moyens, fins				
	Propreté	PR 1 ou PR2				
	Friabilité	Fs < 50				
Base	Granularité	sables grossiers, moyens, fins	Sables grossiers, moyens		Non admis	
	Propreté	PR 1 ou PR2				
	Friabilité	Fs < 50				

On pourra noter certaines différences entre les spécifications des normes et celles du Guide d'Application. Elles concernent aussi bien les sables que les gravillons. Ces différences sont reprises dans le tableau suivant (***tab.15-6***).

tab.15-6 : comparaison des spécifications entre les normes produits et le Guide d'application des normes pour le réseau national

Techniques	Gravillons		Sables	
	Normes « produits »	Guide d'application	Normes « produits »	Guide d'application
GTLH	D à E	C à E	b à c	b
STLH	/	/	PR suivant VBS	PR 1 et 2
GNT	C à F	C à E	a à c	c à d

Le guide d'application des normes précise que les caractéristiques des gravillons seront au minimum de E, et non plus F pour les GNT.

Pour les graves traitées aux liants hydrauliques, la propreté des sables retenue est b uniquement. Par contre, pour les GNT, la qualité des sables passe de a/c à c/d.

Toutefois, le Guide d'application des normes précise dans la partie Règle applicable aux granulats, que :

« **des *assouplissements peuvent cependant être envisagés en vue de l'utilisation de granulats ne répondant pas à une ou plusieurs des spécifications imposées (dans le document), sous réserve que ces granulats aient fait l'objet de plans d'expérimentation rigoureux susceptibles d'évaluer les risques encourus avec précision*** ».

154) CONCLUSION

La connaissance des particularités relatives à l'emploi des matériaux ayant des caractéristiques différentes (entendre « inférieures ») à celles retenues dans les textes officiels repose sur les données issues des recherches et applications tests au niveau local.

Cette fois, et plus encore que pour les normes produits, on voit bien l'ouverture que donnent le SETRA et le LCPC à l'emploi des matériaux ou granulats locaux.

C'est donc bien au niveau régional que doit se régler le problème des substitutions de granulats et tant qu'un guide n'est pas en place au niveau de la Lorraine, des interdictions pourront être prononcées sous prétexte que les « réactions » des matériaux de faibles caractéristiques intrinsèques ne sont pas connues.

1 – 6 PROJET D'OUVRAGE ET ETUDE EN LABORATOIRE

161) INTRODUCTION

Lorsqu'un ouvrage est envisagé, quelles qu'en soient la nature et la destination, une des données principales est la qualité des matériaux constitutifs.

La qualité des produits peut être appréciée de deux manières selon le contexte du projet. Les produits devront être conformes :

- Parce qu'ils respectent des disposition normatives (normes, DTU, etc.)
- Parce qu'ils sont connus et maîtrisés même si certaines de leurs caractéristiques sont « dérogatoires ». Dans cet esprit, on peut noter une phrase encourageante qui a été prononcée durant la journée UNICEM – Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées Nancy du 13 novembre 1998 : "*Les normes PRODUITS et la norme GRANULAT ne sont pas un obstacle aux changements d'habitudes*".

Dans les lignes qui vont suivre, nous nous attacherons à décrire le premier point, c'est-à-dire, les méthodes et essais normalisés. Le second point sera débattu en conclusion.

Les travaux routiers et les ouvrages de plates-formes industrielles sont caractérisés par le fait qu'ils nécessitent, pour leur réalisation, de grandes quantités de matériaux.

Dans le coût global des travaux, le *transport* des granulats est un poste de dépense très important. Cela conduit tous les acteurs du projet à rechercher des gisements de matières premières les plus proches possibles du chantier ou du tracé routier. Si, pour certaines parties d'ouvrages, des caractéristiques bien particulières sont nécessaires (CPA, LA, MDE, couleur des grains, natures pétrographiques spécifiques, etc.), on peut facilement admettre que dans les autres cas, la recherche d'une adaptation locale est préférable.

Cela implique que la nature, la qualité des matières premières vont souvent changer en fonction des projets. Cette variabilité devra donc être prise en compte, et les entreprises qui « répondent » aux appels d'offre devront être en mesure de montrer le bien fondé de leurs choix de matériaux par *des études de matériaux en laboratoire.*

Mais avant de revenir sur la description des essais de laboratoire, nous allons rapidement commenter la place du laboratoire dans le contexte d'une entreprise. L'objectif étant de bien situer le rôle de ce service dans un projet et de mieux comprendre par ce biais la

finalité des études de matériaux. Ici, nous développerons uniquement les analyses effectuées sur les MTLH ou les GNT.

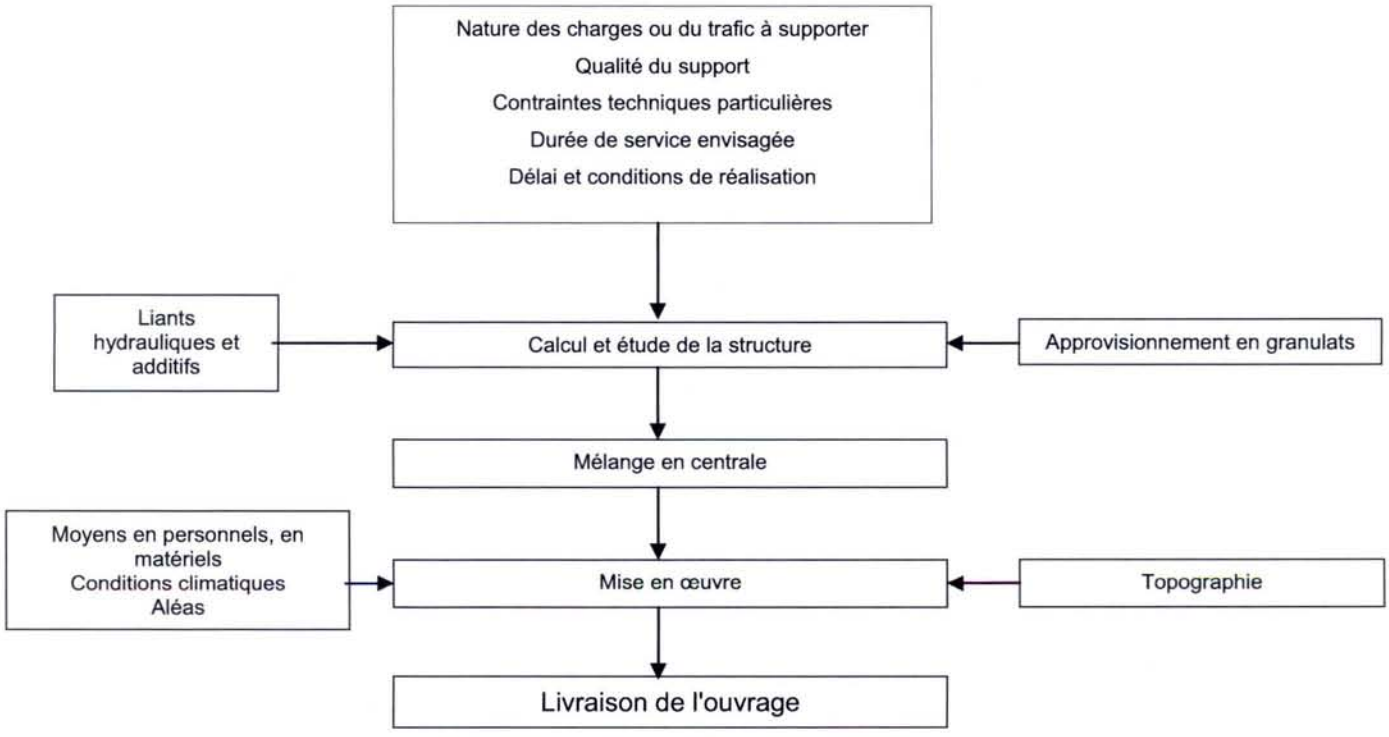
162) REALISATION D'UN OUVRAGE ROUTIER : le rôle du service technique et du laboratoire

Nous avons choisi ici de remonter très en amont dans le concept d'ouvrage, de manière à montrer le rôle qu'ont le Service Technique et le Service Laboratoire d'une Entreprise

Le but d'un ouvrage, quel qu'il soit, est de satisfaire un niveau de service prédéterminé. Les moyens pour y parvenir sont variés. Toutefois, les paramètres à gérer, dans notre domaine d'activité, sont finalement en nombre limité.

En partant d'un projet, on peut synthétiser la maîtrise de ces paramètres de la manière suivante (***fig.16-1***) :

fig. 16-1 : Représentation schématique de la maîtrise des différents paramètres pour la réalisation d'ouvrages routiers.



Les données de départ afférentes à la nature du projet servent de base à l'établissement de la méthode à suivre pour aboutir à un niveau de service, en tenant compte de l'existant et des disponibilités.

La prise en compte des matières premières est une phase de réflexion importante, car des décisions prises vont découler les points suivants :

- choix des matériaux de base,
- choix des additions pour les traitements éventuels,
- moyens de fabrication des mélanges (et des constituants, exemple : bitumes modifiés en usine),
- matériels nécessaires de mise en œuvre,
- conditions et précautions de mise en œuvre,
- cadences d'application et donc coût de réalisation,
- date de mise en service.

La réalisation qui vient ensuite, doit être conforme aux directives établies dans la phase 1. Elle ne sera plus tributaire que de trois paramètres :

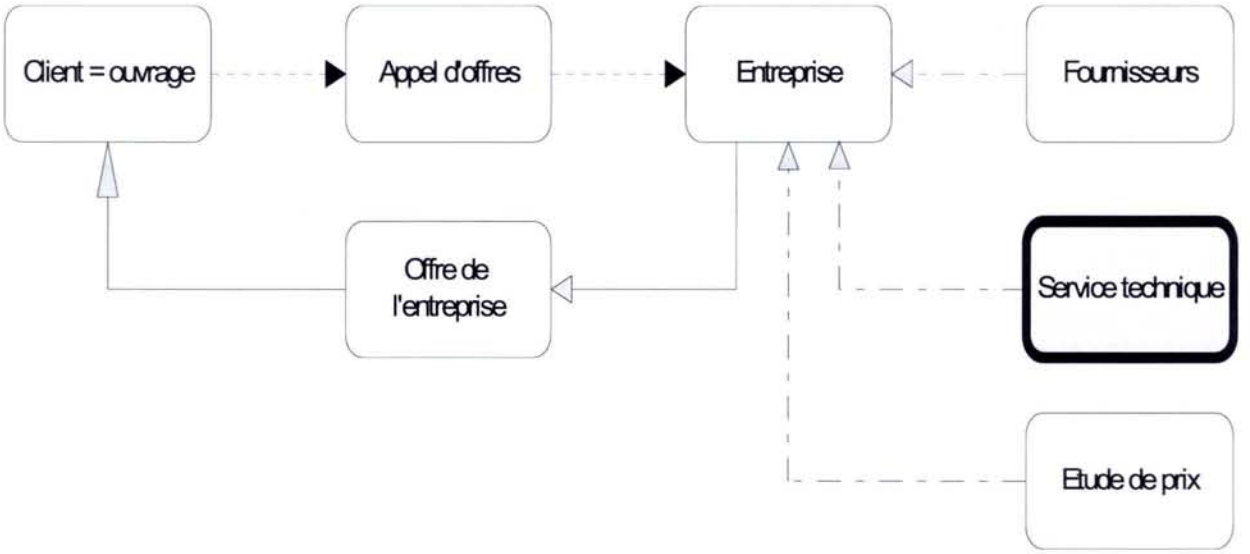
- les conditions climatiques,
- les impondérables dus aux aléas,
- les imprévus sur le tracé (généralement dus à des problèmes de géotechnique ou de circulation).

La mise en service de l'ouvrage correspond à la livraison au client. Elle est aussi le point de départ de la mise en service des structures.

Dans les lignes qui suivent, nous allons présenter le rôle du laboratoire avec des schémas. Le but est de comprendre les liens fonctionnels et les missions qui sont dévolus à cette entité. Pour cela, nous démarrerons très en amont d'un projet, et d'un point de vue de l'Entreprise.

Dans le schéma ci-dessous (***fig. 16-2***), on voit apparaître les liens qui conduisent à l'établissement de l'offre d'une entreprise. La réponse d'offre est aussi basée sur la ressource technique de l'entrepreneur (par le biais de son service technique) pour tout ce qui a trait aux choix des matériaux et des variantes à la solution de base du marché.

fig. 16-2: représentation schématique des liens entre les intervenants dans l'étude d'une prise d'affaire



Le service technique d'une entreprise remplit alors trois rôles principaux (***fig. 16-3***) :

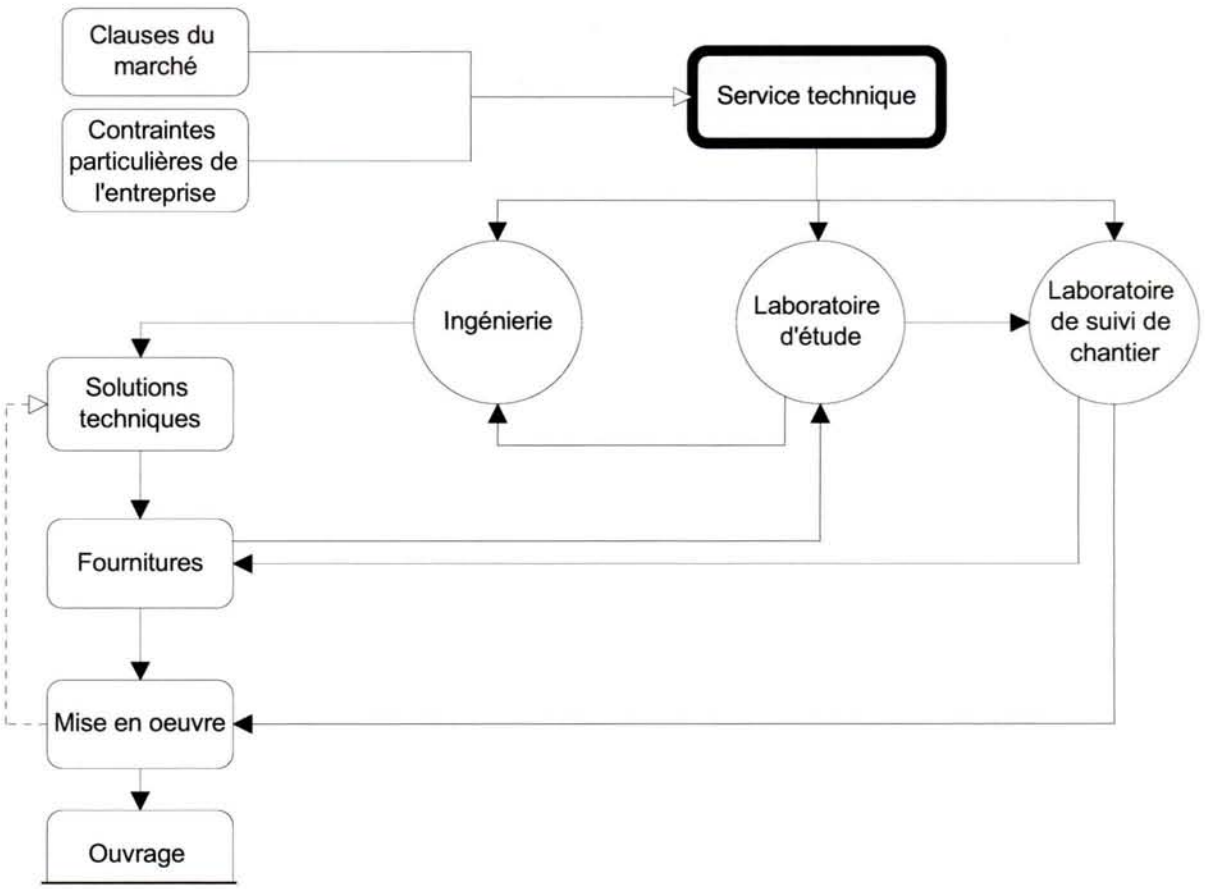
- trouver des solutions adaptées aux attentes du client,
- apporter des moyens (humains et matériels) pour les études de convenance,
- apporter les moyens pour le suivi de la mise en œuvre des techniques prédéfinies aux études.

Il intervient donc depuis l'étude de l'offre à la livraison de l'ouvrage. Plus précisément, on note la prise en charge des activités suivantes :

- conception (éventuelle) d'une variante et détermination des divers paramètres de mise en œuvre, choix des constituants, calculs des structures, etc.
- détermination des caractéristiques des fournitures en laboratoire
- vérification des hypothèses initiales
- établissement des références de mise en œuvre
- vérification de la conformité des approvisionnements par rapport aux échantillons d'étude

- vérification de la mise en œuvre par rapport aux paramètres d'étude de convenance
- validation des solutions en fonction de problèmes liés à la mise en œuvre ou suite à des aléas

fig. 16-3: implication du service technique dans l'entreprise routière



Le laboratoire, au sein du service technique de l'entreprise, a pour rôle de déployer des *moyens de mesures*, qui permettent de qualifier la nature, la qualité, et les conditions de mise en œuvre des produits sur le chantier. De plus, lors de la réalisation des travaux, il lui incombe de vérifier (contrôler) que les conditions préalablement déterminées sont effectivement respectées.

Dans le cadre du développement des produits, le laboratoire a la charge d'effectuer toutes les démarches nécessaires à leur mise au point, en conformité avec les règles méthodologiques et les prescriptions imposées par les clients de l'entreprise. Cette mission principale est la « conduite d'une étude de produit en laboratoire ». Les lignes suivantes expliquent cette approche méthodologique.

163) ETUDE DE MTLH EN LABORATOIRE

Lorsqu'un projet est envisagé, les entreprises répondent à l'appel d'offre sur la base de la solution initiale ou de variantes techniques. Ces variantes reposent soit sur des textes officiels, soit sur l'expérience de l'entreprise. En fonction des matériaux choisis (ou imposés par le client), l'entreprise peut alors :

- proposer directement à l'agrément du client des études antérieures qui lui servent de références.
- réaliser des études en laboratoire si elle ne dispose pas de références pour prouver que les caractéristiques mécaniques et comportementales des mélanges proposés sont en adéquation avec la demande qui lui a été faite.

Comme nous l'avons évoqué précédemment, l'aspect géographique des travaux routiers fait que pour un même type d'ouvrage, on est souvent obligé d'envisager de nouveaux matériaux, pour limiter notamment les coûts de transport qui déterminent à eux seuls un pourcentage élevé du coût total des travaux. Par conséquent, l'utilisation de granulats issus de nouveaux sites réduit les chances d'une entreprise de disposer d'études en adéquation avec l'emploi qu'elle souhaite en faire.

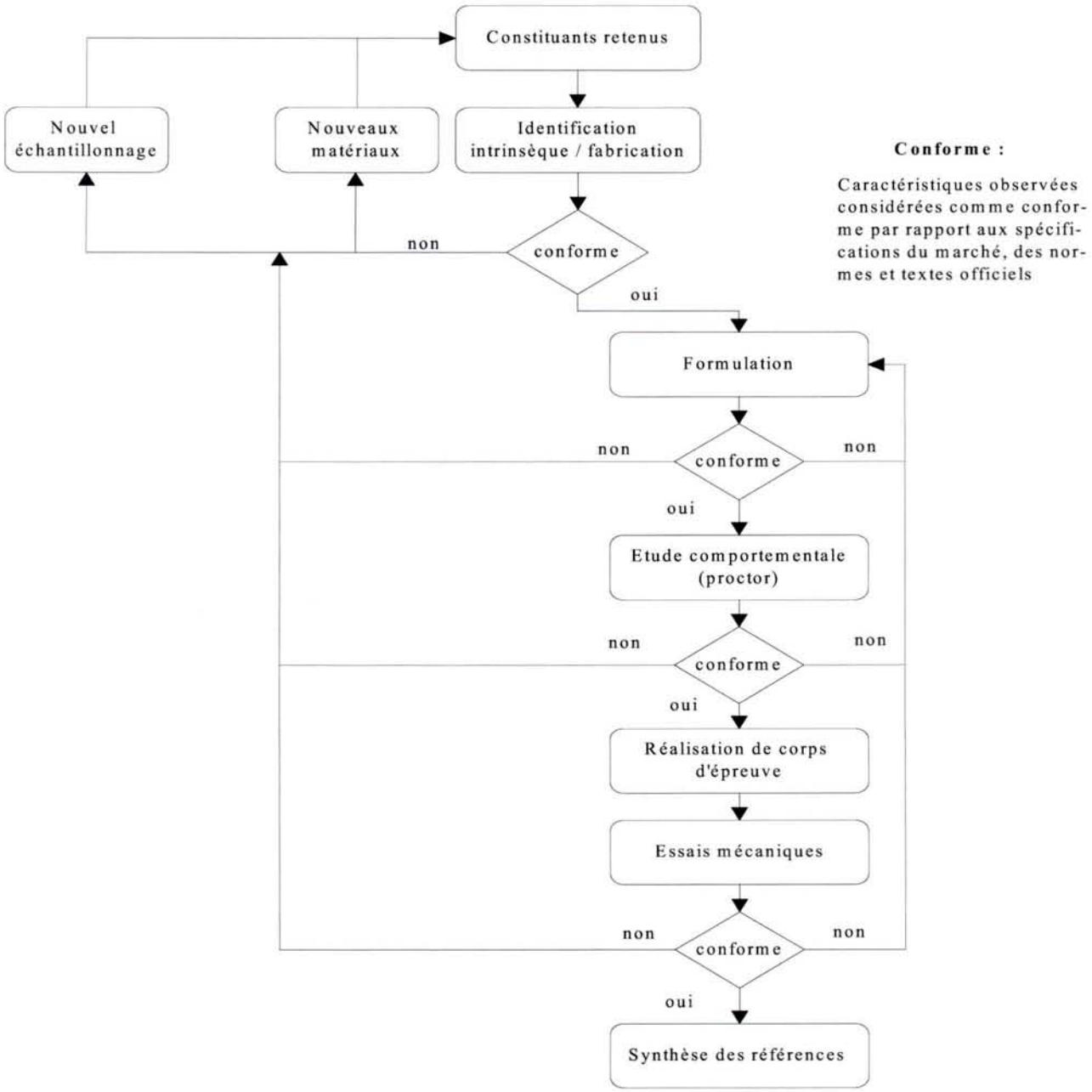
Il existe beaucoup de « produits » pouvant être mis en œuvre dans le cadre de travaux routiers ou industriels (plate-forme, remblai, assainissement, etc.). Mais dans le cadre de nos travaux, rappelons que seules sont considérées les techniques dites "blanches " c'est-à-dire faisant appel à l'utilisation de liants hydrauliques. Il s'agit des mélanges traités aux liants hydrauliques, ou MTLH.

D'un point de vue normatif, les méthodologies d'étude des MTLH sont reprises dans les normes NF P 98-114-1 [***F-1***] et 2 [***F-2***]. Ces textes définissent les conditions d'étude de manière précise. Ils fixent également le niveau d'étude qu'il faut envisager en fonction du contexte du travail à mener (étude « complète » ou « réduite ») et rappellent les références normatives en rapport avec les différents essais nécessaires à la conduite de l'expérimentation. Il n'est pas opportun de reprendre ici le contenu de ces normes. Nous souhaitons cependant présenter les principaux essais de base conduisant à l'obtention des connaissances nécessaires et suffisantes aux caractéristiques d'un mélange

envisagé. Ces essais sont aussi ceux qui ont été régulièrement pratiqués sur les matériaux calcaires qui font l'objet de cette étude.

L'organigramme ci-dessous (***fig. 16-4***) présente le mode de conduite d'une étude, depuis le choix des constituants (la technique envisagée est une donnée), jusqu'à l'établissement de la synthèse des résultats qui servira de référence pour le chantier, mais également pour l'établissement (ou la vérification) des calculs de dimensionnement de la structure.

fig. 16-4 : schéma général de la conduite d'une étude en laboratoire



Echantillonnage des matériaux

La première phase de travail en laboratoire consiste à effectuer un échantillonnage des divers constituants qui vont entrer dans la composition des mélanges à étudier. Ce travail est fondamental car il conditionne la représentativité de l'étude, par rapport à l'ouvrage final.

Il arrive fréquemment que nous soyons sollicités pour effectuer des études de matériaux qui vont être mis en œuvre dans des quantités exprimées en dizaines de milliers de tonnes. Pour ce genre d'affaire, les échantillonnages de laboratoire s'expriment en centaines de kilogrammes. Le facteur d'échelle est gigantesque. Avec cet exemple, on mesure aisément l'importance que revêt la représentativité de l'échantillonnage des matériaux qui vont être étudiés par rapport à ceux qui vont être livrés sur le chantier.

Cette représentativité peut être exprimée par :

- l'appartenance stricte de l'échantillon au fuseau de régularité de production de la carrière,
- la reconnaissance d'un stock dédié au chantier ,
- dans le cas de matériaux variables (il s'agit plus des matériaux de type « sols » ou « recyclés »), le suivi de la variabilité et l'adaptation du produit.

Identification des constituants

L'identification consiste à mesurer des grandeurs *caractéristiques* des constituants de base, en veillant à ce qu'ils soient représentatifs de la production et qu'ils répondent aux *attentes*.

A l'issue de cette identification, la conformité des matériaux (granulats, liants, ajouts, eau, etc.) doit être prononcée. Pour reprendre un vocabulaire de «*qualititien*», un point d'arrêt est effectué pour juger de la situation et éventuellement rejeter les échantillons (voire le choix initial des matériaux).

Les diverses identifications décrites dans la suite de ce document concernent essentiellement les granulats entrant dans la composition des MTLH. On considérera que les liants hydrauliques utilisés sont conformes à la normalisation en vigueur et que les autres ajouts ont fait l'objet de caractérisations spécifiques.

Les granulats, constituants majoritaires des MTLH, sont caractérisés au regard de leurs caractéristiques *intrinsèques* et de leurs caractéristiques de *fabrication*.

Les essais permettant de mesurer ces deux types de caractéristiques sont brièvement rappelés ci-après.

➢ *Coefficient Los Angeles*

Cet essai a pour but de déterminer la *résistance aux chocs* des gravillons. Le principe général consiste à faire subir à 5 kg de gravillons des chocs provenant de la chute de boulets dans un système en rotation. Au bout de 500 rotations, l'échantillon est extrait du tambour et tamisé à 1,6 mm [***F-3***]. La valeur du coefficient Los-Angeles (LA) est exprimée de la manière suivante :

$$LA = \frac{(Mo - Me)}{Mo} * 100$$

Avec : Mo : Masse de granulats avant essai (5000 g)

Me : Masse du refus sec au tamis de 1,6 mm, après essai.

➢ *Coefficient micro-Deval (en présence d'eau)*

Cet essai permet de connaître la résistance à *l'attrition* d'un gravillon (résistance au frottement mutuel des grains en présence d'une charge abrasive et d'eau) [***F-4***]. Le mode opératoire est basé sur la mise en contact d'un gravillon (500 g) avec une masse métallique (billes d'acier) dans un cylindre mis en rotation, le tout en présence d'eau. Au terme de 12000 rotations, l'échantillon de gravillons est passé sur un tamis de 1,6 mm et le *refus* est pesé sec. La valeur du coefficient micro-Deval en présence d'eau (MDE)[1] est exprimée suivant la relation :

$$MDE = \frac{(Mo - Me)}{Mo} * 100$$

Avec : Mo : Masse de granulats avant essai (500 g)

Me : Masse du refus sec au tamis de 1,6 mm, après essai.

[1] Il existe une variante à cet essai par voie sèche qui ne concerne pas notre domaine d'étude.

➢ *Masses volumiques*

La détermination de la masse volumique d'un matériau n'est pas une consigne suffisante en soi si elle n'est assortie du type de masse volumique que l'on souhaite mesurer. En effet, il existe plusieurs variantes à cet essai. Sur une échelle de densité croissante, on trouvera la masse volumique "en vrac". C'est celle qui permet de connaître le cubage d'un camion par rapport à la masse du chargement par exemple.

La masse volumique apparente (MVA) issue de l'essai Proctor est celle d'un matériau compacté. Elle dépend directement du mode de « mise en place » du granulat.

Ensuite, on trouve la masse volumique réelle (MVR) des gravillons et des sables. Elle permet notamment de déterminer la compacité (C) d'un milieu compacté par rapport à l'étude Proctor, selon la relation :

$$C(\%) = \frac{MVA}{MVR} \times 100$$

La masse volumique absolue ne tient compte que de la phase solide, en s'affranchissant de la porosité du milieu (porosité ouverte et fermée).

Les méthodes et matériels de détermination des masses volumiques sont donc nombreux. En ce qui nous concerne, nous mesurons principalement :

- Masse volumique réelle des sable (NF P 18-555 [***F-5***]) : elle est effectuée à l'aide d'un pycnomètre, en présence d'eau. Bien qu'il s'agisse d'un essai simple, il faut absolument garder la maîtrise des bulles qui se trouvent piégée par le matériau. L'essai est donc finalement assez difficile à réaliser et il est bien maîtrisé lorsque le technicien a réalisé un nombre suffisant d'essais.

- Masse volumique réelle des gravillons (NF P 18-554 [***F-6***]) : effectuée sur la coupure 4/D d'un échantillon, la mesure de la MVR d'un gravillon est basée

sur un principe de pesée hydrostatique de grains saturés en eau 24 heures à la pression atmosphérique.

➢ *Analyse granulométrique*

L'analyse granulométrique est l'essai qui permet de connaître la distribution pondérale des tailles des grains dans un échantillon donné de matériaux. Les moyens permettant de connaître cette distribution sont variés. L'appareillage le plus courant est une colonne de tamis dont la taille des mailles carrées suit une progression géométrique de raison : $r = \sqrt[10]{10}$ soit approximativement 1,259.

Les valeurs des dimensions des ouvertures des mailles sont, par exemple, les suivantes (en mm) :

... 0,8 – 1 – 2 – 2,5 – 3,15 – 4 – 5 – 6,3 – 8 - ...

D'autres méthodes permettent de déterminer la distribution des particules. On peut citer, pour les fines, les procédés au laser ou par sédimentométrie. Il existe également le vidéo-granulomètre pour les grains plus grossiers. La référence pour notre domaine d'étude est la norme NF P 18-560 [***F-7***]. Cette méthode par tamisage est retenue pour qualifier les matériaux au sens de la norme XP P 18-540.

On pèse la masse de passant (ou *tamisat*) à un tamis de dimension connue, que l'on divise par la masse totale de prise d'essai. De fait, le taux de passant est donné en cumulé selon la manière suivante :

$$P\% = \frac{Pi}{Md} * 100$$

Avec : Md : Masse de matière soumise à essai

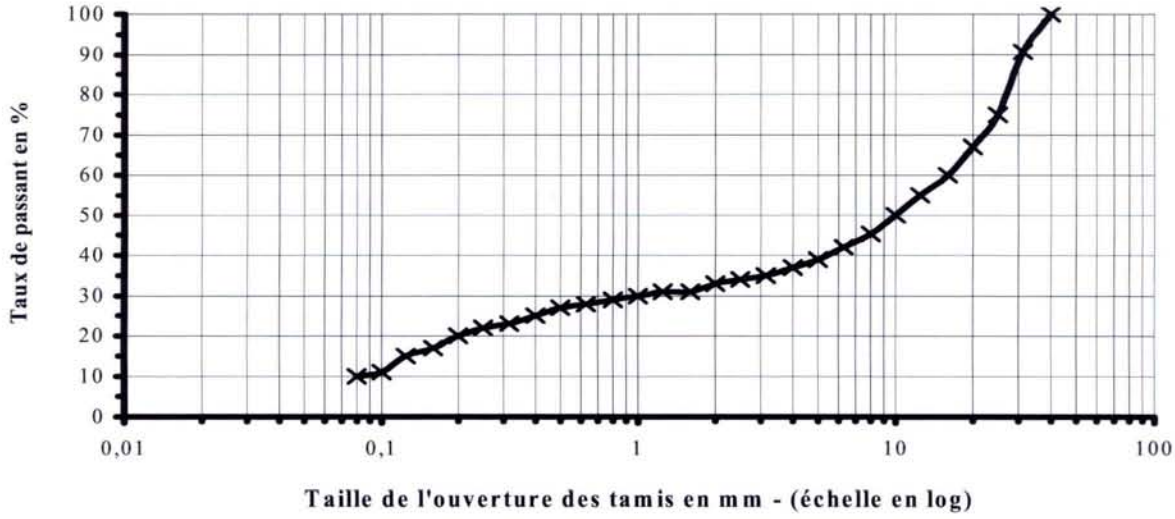
Pi : Masse de passant cumulé sur le tamis d'ouverture i

Les résultats sont reportés sur un graphique granulométrique semi-logarithmique (***fig. 16-5***). Ce mode de présentation est essentiel : outre la détection instantanée

des éventuelles erreurs de manipulation ou de calcul, il permet de s'informer sur le type de distribution auquel on a affaire (homogène, discontinue), et de fixer les critères propres à la taille des particules du matériau analysé (plus gros élément – D max., d, etc.).

fig. 16-5 : exemple de courbe granulométrique d'un échantillon de granulat.

Cas d'une distribution *continue* et *étalée*.



➢ *Coefficient d'aplatissement*

Le coefficient d'aplatissement est un nombre qui permet de donner une évaluation *de la forme des grains d'un granulat* [***F-8***]. Le principe de détermination de l'aplatissement des gravillons 4/D est de soumettre un échantillon à un tamisage, sur des tamis à maille carrées d1/d2 tout d'abord, avec d2 = 1,259.d1, puis sur une grille à fentes parallèles ensuite, dont les barreaux sont écartés de d1/1,58. Chaque tranche mono-granulaire est ainsi traitée et le coefficient d'aplatissement est égal à la somme des passants sur les grilles à fentes rapportée à la masse initiale de l'échantillon. On peut aussi étudier l'aplatissement de chaque tranche élémentaire.

➢ *Propreté des matériaux*

En ce qui concerne les granulats d/D, la propreté est simplement le taux de passant (en %) au tamis de 0,5 mm. Il s'agit donc d'une détermination massique de matière et non une qualification chimique ou de l'activité des éléments de taille inférieure au demi-millimètre.

Pour les autres catégories de matériaux, les 0/D, la détermination de la propreté s'effectue par une méthode dite "au bleu de méthylène" et s'exprime en quantité de bleu de méthylène par unité massique de matériaux (en gramme de bleu de méthylène pour 1 kg d'échantillon). Cet essai tend à mettre en évidence la quantité d'éléments tels qu'argiles, éléments organiques et oxydes métalliques présents dans un matériau mis en suspension dans de l'eau déminéralisée.

Pratiquement, l'essai consiste à verser dans cette suspension des quantités connues d'une solution de bleu de méthylène (10 g/litre) et de vérifier à chaque ajout l'état de saturation des éléments à doser par une méthode dite « à la tache ». Pour cela, une goutte de suspension est prélevée et déposée sur un papier filtre.

L'essai est conduit jusqu'à saturation en bleu marqué par l'apparition d'une auréole bleu clair autour de la tache.

Etude de formulation

La formulation d'un produit est l'action par laquelle on effectue des mélanges des matières en vue d'obtenir un produit équilibré et ayant les performances souhaitées.

Pratiquement, la formulation repose sur la maîtrise de la courbe granulométrique du mélange granulaire. Pour cela, on agit sur les dosages pondéraux des matières premières. Dans le cas où existent des contrastes de masses volumiques réelles entre les constituants, on peut envisager de prendre en compte une reconstitution volumique.

La formulation d'un mélange traité au liant hydraulique ou d'une grave non traitée est la phase qui va directement conditionner les paramètres mécaniques et comportementaux du produit recherché.

Ce travail doit être conduit avec un seul objectif : obtenir les performances demandées en optimisant économiquement les dosages pondéraux des liants hydrauliques (et additifs).

La formulation est le point de départ de toute étude. Dans le domaine routier, les courbes granulométriques des mélanges de graves traitées (ou non traitées) doivent s'inscrire dans un *fuseau de recomposition* comme présenté par exemple dans la norme NF P 98-116 [***F-9***].

En fait, les normes « produits » définissent des fuseaux pour les graves (GTLH et GNT) et non pour les sables. Ces fuseaux tiennent compte de trois types de granulométries : 10,14 ou 20 mm.

La position du squelette granulaire dans le fuseau préalablement spécifié (fuseau 1 ou 2) déclenche la « conformité granulaire » ou le rejet de la formulation.

➢ *Etude comportementale – L'essai PROCTOR*

L'étude « Proctor » permet d'obtenir les *références de compactage*. Les références sont :

- La masse volumique apparente sèche optimale (MVA)
- La teneur en eau « optimale » qui va conduire à l'obtention de la MVA (Wopm)
- La compacité du mélange aux références de compactage OPM

D'une manière très simplifiée, l'étude Proctor consiste à mesurer l'évolution de la MVA sèche d'un produit en fonction de sa teneur en eau [***F-10***], pour une énergie de compactage conventionnelle et constante. Suivant la capacité qu'ont les mélanges granulaires à fixer l'eau, deux types de courbes peuvent être obtenus [***F-11***] : dans le cas des matériaux « drainants », la courbe ne présente pas d'optimum mais une inflexion. Pour les autres matériaux, la courbe possède un optimum.

Dans tous les cas, un couple (MVA max ; Wopm) est obtenu et il sert de référence à deux niveaux :

- L'étude en laboratoire de corps d'épreuves pour essais mécaniques
- La détermination des qualités de compactage (Q1, Q2, etc.)

Il existe deux protocoles d'essai : l'essai proctor *normal* et l'essai proctor *modifié*. La différence entre les deux essais est l'énergie de compactage qu'il faut déployer. Dans le cas des MTLH et GNT pour assises de chaussées, c'est le principe du proctor modifié qui est retenu.

Au terme de l'étude proctor, on vérifie la compacité du milieu granulaire. Pour cela, on compare la MVA optimale déterminée à la masse volumique réelle moyenne des constituant du mélange. Le rapport de ces deux grandeurs rend compte de la quantité de vides que la matrice compactée renferme. Pour les GNT, différents seuils sont considérés (car adaptés à la qualité d'élaboration de ces dernières). Pour les GTLH, un taux de compactage de 80 % minimum est imposé.

On comprend aisément l'importance que peut avoir ce facteur sur la stabilité d'un produit. Pour s'en rendre compte expérimentalement, il suffit de comparer les performances de deux GTLH, l'une étant compactée selon la norme (elle donne de bonnes performances) et la seconde simplement moulée sans serrage (elle donne des performances médiocres). D'ailleurs, les méthodologies de conduite d'étude en laboratoire des GTLH, au-delà de la partie « étude réduite », demandent de vérifier les performances mécaniques des produits en faisant varier les taux de compactage.

➢ *Réalisation de corps d'épreuve*

Cette partie ne concerne que les mélanges durcis et traités aux liants hydrauliques.

Divers types d'éprouvettes, servant à la détermination des caractéristiques mécaniques des MTLH, peuvent être réalisés. Ici, nous n'aborderons que la réalisation d'éprouvettes pour la détermination des *résistances à la traction directe* des MTLH : éprouvettes « diabolo » de type 16 x 32 cm. Le moulage des éprouvettes est assujetti à une norme [***F-12***].

Explication succincte : les mélanges, fabriqués selon un mode opératoire « pragmatique », sont mis en étuis et serrés par l'action conjuguée d'une force de compaction verticale et d'une vibration appliquée sur l'étui de l'éprouvette. L'appareil utilisé pour réaliser les moulages est un vibro - compacteur (matériel mis au point par CECP des Ponts et Chaussées). La compacité des éprouvettes est maîtrisée par la

connaissance du volume des étuis et de la masse de matériau traité et humidifié qu'on y introduit.

Les éprouvettes ainsi réalisées sont conservées en étuis étanches. La cure est réalisée à température constante (20°C +/- 2 °C) jusqu'aux échéances des essais mécaniques.

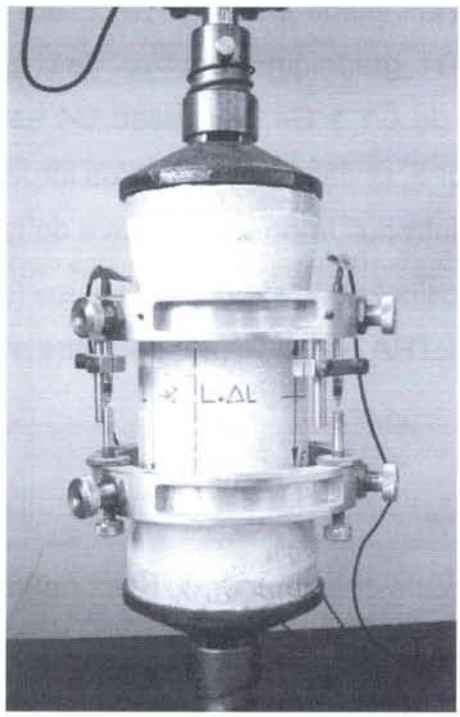
➢ *Essais mécaniques*

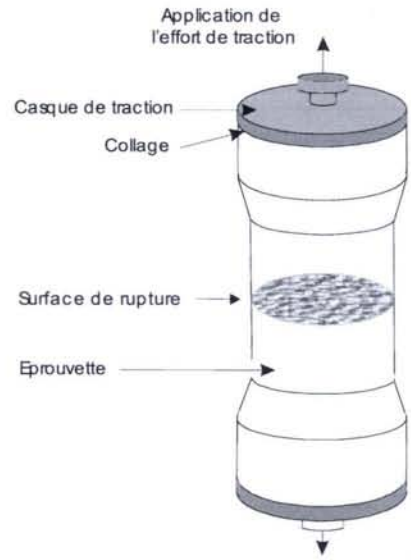
L'essai permettant la qualification *performancielle* des GTLH est l'essai de *traction directe* [***F-13***]. En parallèle à cette détermination, on mesure la rigidité (ou *module*) du mélange durci. Cette détermination s'effectue à 30 % de la charge de rupture de l'éprouvette car, dans cette plage de valeur, on considère que la réponse de la déformation vis-à-vis de la charge est linéaire (déformation purement élastique).

Le principe de l'essai est simple. En revanche, la manipulation est plus délicate car une instrumentation des éprouvettes est nécessaire (***fig. 16-6***).

fig. 16-6 : éprouvette 16 x 32 pour essai de traction directe instrumentée d'un extensomètre pour la détermination du module de rigidité.

Schéma de mise en charge





S.C.D. - U.H.P. NANCY 1
BIBLIOTHÈQUE DES SCIENCES
Rue du Jardin Botanique - BP 11
54601 VILLERS-LES-NANCY Cédex

L'expression des résultats de cet essai est la suivante :

- Résistance à la traction :

$$Rt = \frac{F}{S}$$

avec : Rt : résistance à la traction directe exprimée en MPa, F : force de traction à la rupture et S : surface de rupture

- Module élastique :

$$E_{30} = \frac{R_{30}}{\varepsilon_{30}}$$

avec : E_{30} : module d'élasticité exprimé en MPa, ε_{30} : déplacement relatif (= $\Delta l_{30} / l$ où Δl_{30} est l'allongement de l'éprouvette sous chargement de 30 % de la charge ultime et l est la longueur de la base sur laquelle est prise la mesure : 13 cm).

➢ *Synthèse des résultats*

La synthèse des résultats est la classification mécanique du produit étudié. Cette détermination est faite, dans le cas des GTLH, selon la norme NF P 98-116 [***F-14***]. En fonction des paramètres (Rt et E), un graphique propose des fuseaux de qualification. Les catégories retenues vont de G1 à G4. La classe G4 est la classe mécanique la plus performante. Pour mémoire, et dans un cadre plus large, la norme relative aux graves à hautes performances introduit la notion de grave de type G5.

En fonction de la classification obtenue, le calcul de la structure d'assise (ou le choix d'une structure type dans le catalogue du SETRA par exemple) peut être effectué.

164) CONCLUSION

La conduite d'une étude en laboratoire s'articule donc autour de deux notions :

- ➢ La « qualité » des matériaux constitutifs des mélanges,
- ➢ La « qualité » des produits mélangés et durcis dans le cas des GTLH.

On s'aperçoit que le principe normatif français peut éliminer dès le « départ » certains granulats jugés « non adaptés », sans prendre en compte les performances du produit final. Et, pourtant, entre les « ingrédients » de départ et le mélange durci, nous évoluons dans deux concepts très différents.

Ce principe est heureusement remis en cause par des textes tels que le Guide d'application des normes qui évoque clairement la possibilité d'emploi de matériaux non conventionnels sous réserve que leurs performances, en tant que produits, soient démontrées. En ce qui nous concerne, nous avons pu vérifier, à maintes reprises, que certains matériaux relevant de la catégorie F suivant la norme XP P 18-540 se révélaient être des granulats conduisant à l'obtention de graves traitées de classe G3 voire G4, sans que nous soyons amenés à surdoser exagérément les taux de liants hydrauliques (voir la suite du mémoire).

C'est tout l'objet de ce travail : montrer que des matériaux en limite de spécifications peuvent trouver leur place dans des techniques de type GTLH.

PARTIE 2

GEOLOGIE ET CARACTERISTIQUES DES CALCAIRES DU BAJOCIEN LORRAIN

2- 1 NOTIONS DE ROCHES CALCAIRES

211) INTRODUCTION

Dans cette partie seront présentés succinctement la notion de calcaire, puis les paramètres conduisant au classement des roches calcaires, en fonction notamment des éléments constitutifs, des conditions de dépôt et de la diagenèse. Cette approche est appliquée aux calcaires lorrains.

L'analyse d'une base de données intégrant en particulier les performances mécaniques des granulats permet également d'établir un classement géographique des performances sur la région lorraine. Ces éléments contribuent à une meilleure connaissance « géomécanique » de cette formation.

212) LES ROCHES CALCAIRES

Les roches calcaires [***G-1***] sont des roches sédimentaires carbonatées [***G-2***] issues d'un mélange de constituants minéraux. La sédimentation carbonatée peut être due à l'accumulation de restes d'organismes calcaires particulièrement abondants sur les plateaux continentaux. Il s'agit des sédiments bioclastiques (remaniés) ou organogènes (remaniés ou non) ou résultant de leur activité édificatrice. Elle peut provenir aussi de vases micritiques ou de la précipitation de $CaCO_3$ ou de Mg $(CO_3)_2$.

Les *carbonates naturels* sont les suivants :

- - Carbonate de calcium $CaCO_3$ aragonite ou calcite
- - Carbonate double $(CaMg)(CO_3)_2$ dolomite
- - Carbonate de magnésium $MgCO_3$ magnésite
- - Carbonate de fer $Fe\ CO_3$ sidérose
- - Carbonate de sodium $NaCO_3$ natrons

Les roches calcaires [***G-3***] sont des roches composées essentiellement de matériel carbonaté (au moins 50 % de $CaCO_3$), d'argile (de dimension inférieure à 2 µm) et de quartz (dont la taille comprise entre 2 mm et 2 µm). Ces roches sont en général tendres et font effervescence, à froid, aux acides. Par exemple, avec l'acide chlorhydrique, on a :

$$CaCO_3 + 2HCl \rightarrow CaCl_2 + CO_2 + H_2O$$

Les différents minéraux constituant le calcaire, notamment la calcite, sont très peu solubles dans l'eau pure (13 mg / litre, soit moins que la silice) mais sont solubles dans l'eau chargée de gaz carbonique (2 g/litre), à cause de la formation d'un bicarbonate de calcium

$$CaCO_3 + CO_2 + H_2O \leftrightarrow Ca(CO_3H)_2$$

Deux facteurs peuvent détruire cette solution et faire précipiter la calcite :

- Départ de CO_2 par :
  - élévation de la température,
  - diminution de la pression,
  - absorption du CO_2 par :
    - plantes vertes : formation de tufs
    - cyanophycées : stromatolites
  - sur fonds marins, action bactérienne anaérobie par absorption du CO_2 ou augmentation du pH (par les composés ammoniacaux provenant de la décomposition des matières organiques).
  - agitation de l'eau.

- Départ d'H_2O par :
  - concentration par évaporation
  - concentration par gel : calcin

La formation des roches calcaires peut avoir 3 origines :

- origine détritique : calcaires détritiques
- origine organique :
  - calcaires construits (calcaires coralliens)
    - calcaires à rudiste
    - calcaires à bryozoaires
    - calcaires d'algues
  - calcaires d'accumulation (calcaires à entroques)
    - calcaires à foraminifères
    - lumachelles

- origine chimique ou biochimique :
  - calcaires lacustres
  - tufs ou travertins
  - calcaires grumeleux ou noduleux
  - calcaires marneux et les marnes
  - onyx (*)
  - stalactites, stalagmites (*)

  (*) cas particuliers

213) CLASSIFICATION DES ROCHES CALCAIRES

Il s'agit de rappeler les deux méthodes de classification courantes des roches carbonatées calcaires afin de pouvoir disposer de méthodes codificatrices applicables ultérieurement à ces matériaux, dans le cadre de la normalisation européenne.

Pour cette présentation, nous nous sommes inspiré des travaux de J. Castaing et D. Geisler [***G-3***] qui ont eu, pour sujet d'étude, la reconnaissance des diverses natures de roches dans la région de Nancy.

2131) Classification de Folk

La classification des roches selon Folk fait essentiellement intervenir des critères descriptifs.

La description des roches repose sur les trois éléments suivants :

- les éléments constitutifs de la roche,
- la matrice,
- le ciment.

Folk considère trois types de constituants principaux :

- grains d'origine intra-bassin (allochème), qui sont les éléments constitutifs de la roche,
- micrite (boue de calcite microcristalline),
- spathite (calcite limpide).

A partir de ces trois termes, il forme trois familles principales :

- Roches allochimiques spathiques.

  Ces roches sont formées d'allochèmes cimentés par de la calcite limpide. La calcite ne formant pas la roche à elle seule, les subdivisions se font selon le classement des particules, car le rapport allochème / calcite limpide varie peu.

- Roches allochimiques micritiques.

  Elles sont formées d'allochème dans une matrice de calcite microcristalline. Le rapport allochème sur boue varie beaucoup car, à la limite, la boue calcaire peut constituer une roche à elle seule. Les subdivisions se font donc suivant la proportion des particules.

- Roches micritiques.

  Ces roches sont uniquement formées de calcite microcristalline.

Il existe toutefois une quatrième famille : les biolithiques. Ce sont les roches construites. Du point de vue de la nomenclature, les familles principales sont subdivisées selon la proportion des différents allochèmes.

Les noms de la classification peuvent être *précisés* par des termes modificateurs ayant trait à la taille des grains, à la présence d'éléments terrigènes, à des constituants particuliers.

2132) Classification de Dunham

Cette classification se présente sous forme dichotomique.

Duham établit sa classification selon les textures de dépôt, caractérisées par la dispersion plus ou moins grande des grains dans la matrice, car il estime que la plupart des roches carbonatées conservent leur texture originelle, même si elle ne subsiste que sous forme de *fantôme*.

Dunham porte son attention sur le transport, dont le degré est variable, mais qui reste localisé à l'intérieur d'un bassin. Il existe une différence fondamentale entre les sédiments déposés en eau calme ou en eau agitée ; c'est pourquoi il distingue la boue calcaire et les

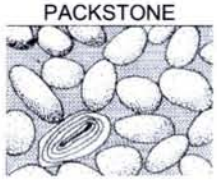
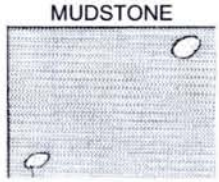
grains dont il situe la limite inférieure de taille à *20 micromètres*. Suivant l'élément qui est majoritaire, le support de la roche est formé de boue ou de grains.

Dunham définit 5 classes texturales qui s'échelonnent entre les eaux calmes et très agitées :

- Mudstone
- Wackstone
- Packstone
- Grainstone
- Boundstone

Une représentation de I. Cojan et M. Renard [***G-2***] permet de visualiser rapidement le type de texture d'une roche avec un grossissement faible, par exemple avec une loupe simple ou binoculaire (***tab.21-1***).

tab.21-1 **:** Classification texturale de Dunham pour les roches calcaires selon (I. Cojan et M. Renard) [***G-2***]

Disposition des grains	**Fréquence des grains**	**Présence de boue carbonatée**	**Absence de boue carbonatée**
Jointifs	> 10 %	PACKSTONE 	GRAINSTONE
Non jointifs		WACKSTONE	
	< 10 %	MUDSTONE 	

2133) Comparaison des méthodes de classification

Il est possible d'établir un parallèle entre les deux classifications (***tab.21-2***) dans la mesure où " micrite " et "boue carbonatée" ont la même signification.

De plus, Folk donne pour les roches d'origine détritiques terrigènes une correspondance avec les roches carbonatées (ligne 2). Les argiles sont assimilées aux mudstones et wackestones (et les grès aux packstones et grainstones).

Le tableau suivant permet de reprendre les deux classifications et d'en faire la comparaison.

tab.21-2 : Comparaison des classifications de Folk et de Dunham

CLASSIFICATION DE FOLK								
Boue calcaire > 2/3					Calcite limpide et boue calcaire en proportions comparables	Calcite limpide > 2/3		
Allochèmes	0 – 1 %	1 – 10 %	10 – 50 %	+ de 50 %		Mauvais classement	Bon classement	Arrondis
Noms des roches types	Micrite et dismicrite	Micrite fossilifère	Biomicrite à éléments clairsemés	Biomicrite à éléments serrés	Biosparite mal lessivés	Biosparite à éléments non classés	Biosparite à éléments classés	Biosparite à éléments arrondis
Terminologie (1959)	Micrite et dismicrite	Micrite fossilifère	Biomicrite		Biosparite			
Analogie avec les roches terrigènes	Argiles		Argiles sableuses	Grès argileux ou grès n'ayant pas leur maturité		Grès proche de la maturité	Grès à sa maturité	Grès au-delà de sa maturité
CLASSIFICATION DE DUNHAM								
Dénominations	**MUDSTONE**		**WACKES-TONE**	**PACKSTONE**		**GRAINSTONE**		

Dans l'étude du Bajocien lorrain qui suit, nous ferons référence à la classification de Dunham.

2 – 2 LE BAJOCIEN LORRAIN

221) INTRODUCTION

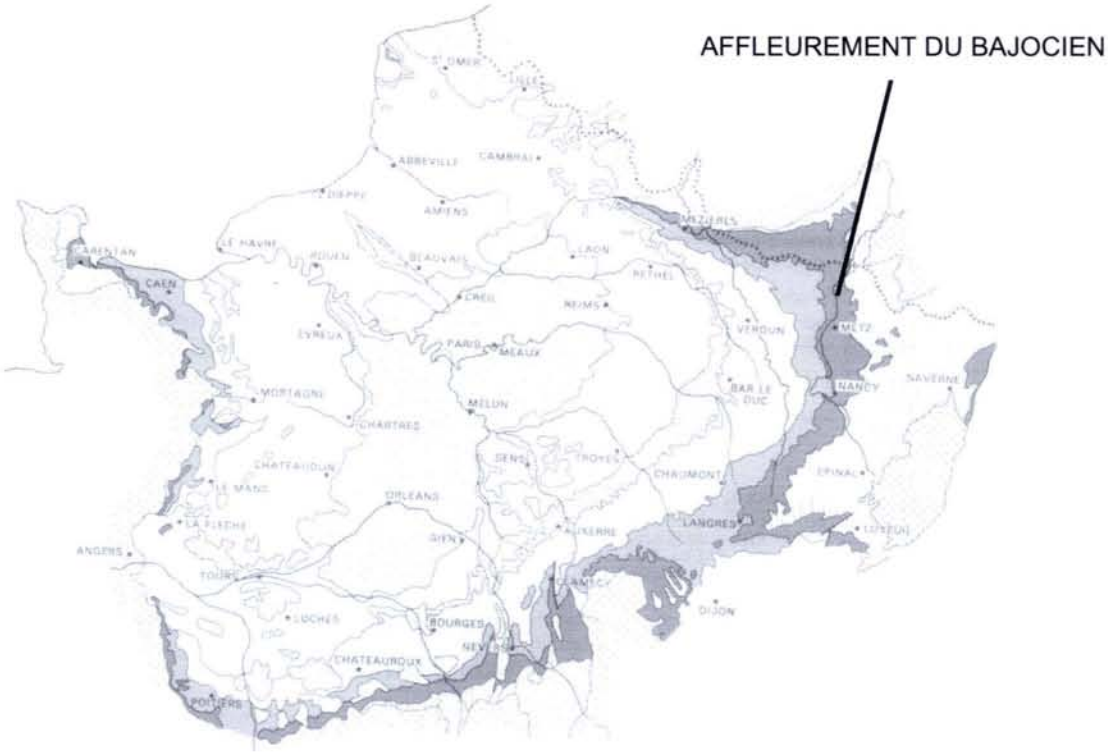
Le bajocien lorrain est une formation sédimentaire appartenant aux séquences de sédimentation du bassin de Paris. Cette partie de mémoire rappelle, sur la base de données bibliographique, la position géographique des affleurements du Bajocien ainsi que sa puissance, à partir de coupe chronostratigraphiques. La prise en compte de ces deux éléments doit permettre de se figurer la répartition spatiale des différents faciès qui présentent de grandes variations latérales, mais également verticales.

Les travaux de Castaing et de Geisler permettent d'établir la classification des différentes textures relevées sur des échantillons, à partir de lames minces.

222) BASSIN PARISIEN

Les deux cartes suivantes permettent de positionner les affleurements du Bajocien dans l'ensemble du bassin parisien (***fig.22-1*** et ***fig.22-2***) dans sa partie orientale.

fig. 22-1 **:** Auréole de l'affleurement du Bajocien dans le contexte du bassin sédimentaire parisien. Source : BRGM [***H-1***]

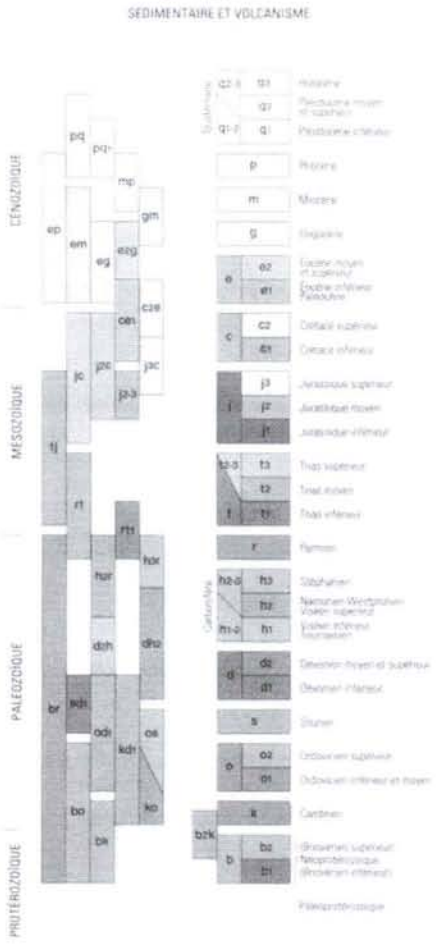


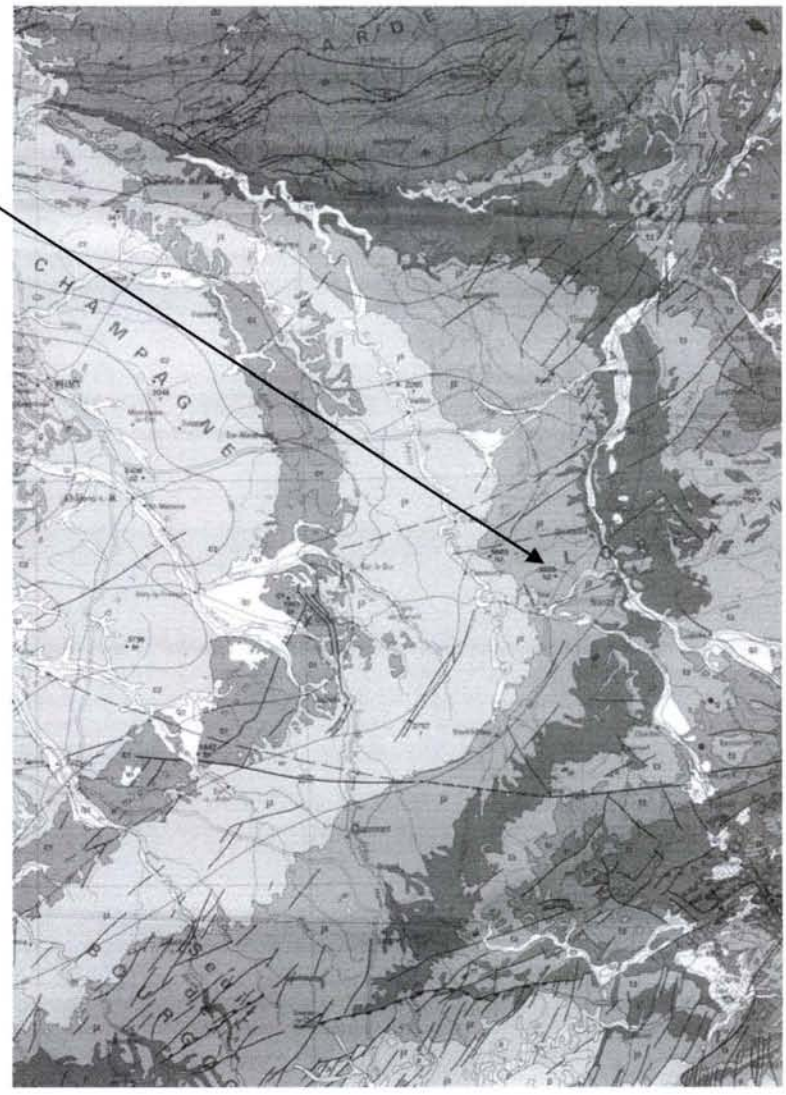
Le bassin parisien, ébauché à la fin du Trias, fonctionne pleinement au Jurassique (de -208 à –146M.a.) [***H-2***]. La formation carbonatée lorraine du Bajocien s'est déposée dans ce bassin marin entre –173.5 et 166.1 M.a. [***H-3***]. A l'échelle de la série Jurassique, le Bajocien enregistre l'installation de grandes plates-formes carbonatées. Toutes ces formations présentent des calcaires à entroques à la base, puis des constructions récifales suivies de dépôts oolithiques.

fig. 22-2 : Représentation des formations calcaires orientales du bassin parisien
Source : BRGM [***H-4***]

Localisation de l'affleurement du Bajocien (j2)

Légende de la carte



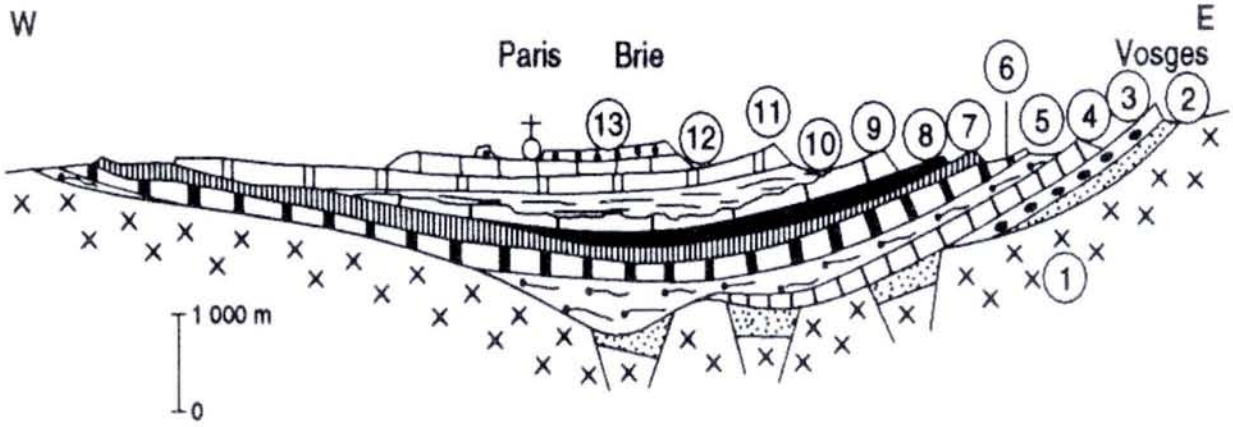


Cette distribution géographique résulte de déformations post-Jurassiques du Bassin de Paris et de l'érosion des terrains Jurassiques continentaux portés à l'affleurement, voire de sédimentations continentales. Les sédiments se présentent à grande échelle sous formes calcaires ou crayeuses et marneuses. Les dépôts continentaux comportent des alluvions anciennes siliceuses, des limons de plateaux et des éboulis de pentes.

Le Bajocien forme un plateau calcaire très fracturé. Les terrains, à prédominance calcaire, qui constituent le substratum de plateau reposent sur une épaisse série argileuse. Les fossiles rencontrés appartiennent à des restes d'organismes marins, ce qui traduit des conditions de sédimentation marines.

A l'est, les strates du Bajocien s'enfoncent vers l'ouest sous les couches plus récentes, avec un pendage allant de 4 à 8 %La su rface topographique du plateau est une surface d'érosion qui se raccorde progressivement à l'ouest à une surface structurale. Le bord oriental est marqué par un relief caractéristique en cuesta (***fig.22-3***).

fig. 22-3 **:** Coupe schématique du Bassin de Paris illustrant le relief en cuesta [***H-5***]



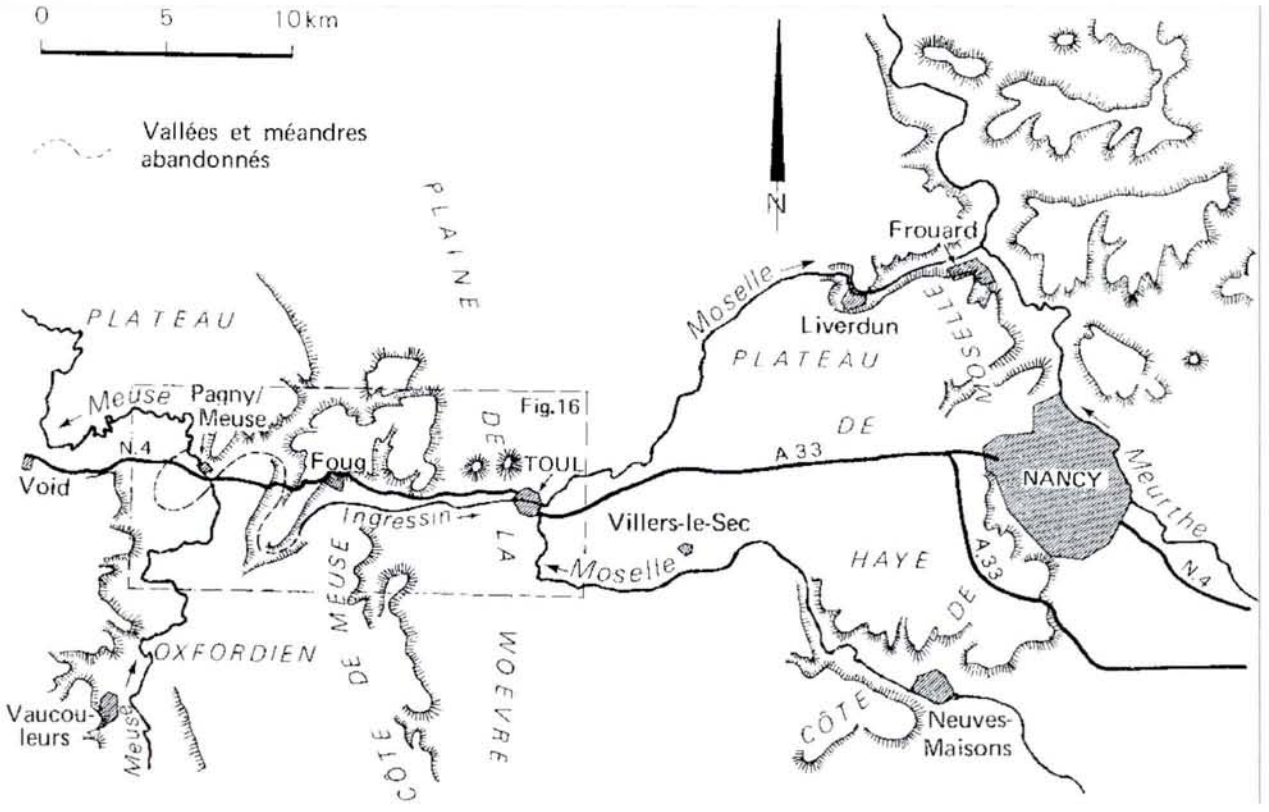
1. Socle antépermien
2. Permien
3. Grès bigarré (Trias)
4. Muschelkalk
5. Trias supérieur
6. Jurassique inférieur
7. Aalénien-Bathonien (côte de Moselle)
8. Callovien-Oxfordien (côte de Meuse)
9. Kimméridgien-Portlandien (côte des Bars)
10. Crétacé inférieur
11. Crétacé supérieur (côte de Champagne)
12. Éocène (côte de l'Ile-de-France)
13. Oligocène

223) STRATIGRAPHIE DU BAJOCIEN LORRAIN

2231) Présentation des différents lithofaciès

La description des lithofaciès proposée (***tab.22-1***). repose sur la reconnaissance de l'itinéraire numéro 2 du Guide Géologique Régional Lorraine Champagne (***fig.22-4***) [***H-6***]. Les auteurs précisent que les épaisseurs données ne correspondent, souvent, qu'à des valeurs moyennes

fig. 22-4 : Itinéraire de reconnaissance géologique n2 – Guide géologique régional Lorraine / Champagne



tab. 22-1 : Description des différents lithofaciès du Bajocien lorrain
Itinéraire n2 du Guide Géologique Lorraine Champagne

Subdivisions chronostratigraphiques	Lithofaciès et formation lithostratigrafiques	Epaisseurs
Bajocien supérieur	Polypiers de Husson Oolithe miliaire supérieure	18 m
	Oolithe à Clypeus ploti Marnes à Homomyes	25 m
	Oolithe miliaire inférieure	20 m
	Marnes de Longwy	2 m
Bajocien moyen	Polypiers supérieurs	15 m
	Oolithe cannabine	2 m
	Polypiers inférieurs	23 m
Bajocien inférieur	Calcaire oolithique et calcaire à entroques	20 m
	Calcaire sableux de Haye Marnes micacées	25 m

2232) Description des lithofaciès

Cette partie reprend d'une part la description des différents lithofaciès du Bajocien lorrain, du sommet à sa base, à partir des données du BRGM [***H-1***] et des travaux de J. Castaing et D. Geisler [***H-7***] et donne d'autre part leur classification dans le référentiel de Dunham, pour la région de Nancy.

Les éléments présentés constituent une synthèse personnelle des données relatives à la formation, à l'aspect et à la distribution spatiale des lithofaciès.

Elle permettra au lecteur non spécialiste de vérifier la diversité des faciès rencontrés et de comprendre la difficulté de produire des granulats de caractéristiques toujours satisfaisantes et homogènes.

- **Polypiers de Husson** : c'est une formation récifale appartenant au sommet du Bajocien. Les faciès à polypiers de Husson se développent en taches de quelques kilomètres carrées dans l'oolithe miliaire supérieure, depuis Neufchâteau jusqu'à Toul. Il s'agit d'un faciès proche de celui des calcaires

compacts de Neufchâteau, qu'ils annoncent. Les polypiers de Husson ne présentent pas partout leur faciès à polypiers. Le plus souvent, il s'agit d'un calcaire à grain très fin, microcristallin ou sublithographique, alternant avec des bancs marneux. Localement abondent les térébratules ou les polypiers. Dans ce dernier cas, la stratification est détruite et se montre volontiers biocalcarénitique.

- **Oolithe miliaire supérieure** : Complexe à stratification oblique, formé de calcaires oolithiques généralement fins (oolithe de la taille d'un grain de millet). Elle présente des caractéristiques comparables à celles de l'oolithe miliaire inférieure.
- **Oolithe à Clypeus ploti** : Ensemble de marno-calcaires à pseudo oolithes à nubéculaires, très mal classées et oblongues, se présentant en bancs marneux et calcaires décimétriques, alternant plus ou moins régulièrement, très riches en faune. L'oolithe à Clypeus ploti est de moins en moins argileuse vers le sud et de la base au sommet.
- **Marnes à Homomyes** : Il s'agit d'un niveau de marnes (de 30 à 50 % d'argile) séparant l'oolithe de Jaumont à la base, du pseudo Jaumont au sommet, depuis les environs de Nancy jusque dans la région de Longuyon.
- **Oolithe miliaire inférieure** : (Bâlin) l'oolithe miliaire inférieure est constituée par un ensemble de calcaires oolithiques, blanc à beige. La puissance passe à près de 35 à 40 mètres à Neufchateau. Au nord, au-delà de la faille de Metz, le Bâlin passe rapidement à l'oolithe de Jaumont. Cet ensemble est pauvre en argile.
- **Marnes de Longwy** : Il s'agit d'une assise marno-calcaire située sur la surface indurée et taraudée des calcaires à polypiers, passant progressivement vers le sommet au Bâlin au sud et vers l'oolithe deJaumont au nord. L'épaisseur est de 2 à 3 m au sud et de 5 à 6 m au nord.
- **Polypiers supérieurs** : C'est la partie supérieure des calcaires à polypiers qui sont séparés par l'oolithe cannabine. Ces calcaires sont inclus dans l'ensemble des calcaires à entroques, oolithiques ou à entroques, sublithographiques ou coquilliers, entrecoupés de récifs coralliens interstratifiés (biostromes) ou en coupole (biohermes). Cette formation se

charge de quelques passées argileuses vers le sommet (sondage de Saizerais).

- **Oolithe cannabine** : C'est un ensemble de quelques mètres de puissance (de 2 à 8 en moyenne) de bancs de calcaires à grosses pseudo-oolithes à nubéculaires (foraminifères proches des milioles), sphériques et bien classées. Geisler précise que trois faciès peuvent être distingués : des calcarénites pauvres en matériaux terrigènes (10 à 15 ‰ des calcarénites riches en argiles (30 à 35 ‰ et les marnes à pseudo-oolithes.
- **Polypiers inférieurs** : (Cf polypiers supérieurs). Ils correspondent au développement de colonies de Polypiers entre lesquelles se déposent des boues calcaires à organismes de petites tailles. Il en résulte un calcaire, pauvre en insolubles, assez hétérogène du fait de la juxtaposition des colonies de polypiers plus ou moins recristallisés, et de calcaire micritique.
- **Calcaire oolithique** : (oolithe blanche et calcaires coquilliers) Ce niveau présente une grande homogénéité texturale (packstone). Elle est caractéristique par une alternance fine de feuillets oolithiques et bioclastiques. Les matériaux terrigènes sont diffus dans la formation et représentent moins de 10 % de la roche totale.
- **Calcaire à entroques** : Ensemble de bancs calcarénitiques, à entroques et coquilliers.
- **Calcaire sableux de Haye** : Ensemble de marno-calcaires ou de calcaires gréseux à joints argilo-sableux ou sableux, situé entre les marnes micacées à la base et les calcaires à entroques au sommet.
- **Marnes micacées** : (terme de mineur). Niveau marneux ou marno-calcaire situé à la base des calcaires sableux

Des carrières sont implantées dans les différents faciès indurés de cette formation, selon la position géographique des affleurements. La qualité des granulats produits est fonction du ou des niveaux interceptés et de la capacité industrielle à traiter les éventuelles pollutions argileuses ou marneuses apportées par les couches plus tendres ou ayant colonisées les nombreuses fractures parcourant l'ensemble du massif (failles, diaclases, stylolithes, etc.)

2233) Séquences principales de sédimentation à l'échelle de la Lorraine

Boëdec reprend les données de J. Le Roux [***I-8***] qui divise le Bajocien en trois séquences principales, comme l'indiquent les coupes chronostratigraphiques reprises ci-après (***fig. 22-5, 22- 6 et 22- 7***).

Le repérage de ces coupes est reporté sur un extrait de la carte géologique de la France au 1/1000000 – 5e édition (***fig. 22-8***). On peut également y remarquer les limites d'affleurement du Dogger qui regroupe les niveaux de l'Aalénien, du Bajocien, du Bathonien et du Callovien.

Ces coupes montrent clairement les multiples variations verticales et latérales des faciès, qui accentuent les difficultés d'une compréhension simple de la volumétrie du système, tant à l'échelle de la formation que des carrières.

fig. 22-5: Séquence des calcaires à polypiers

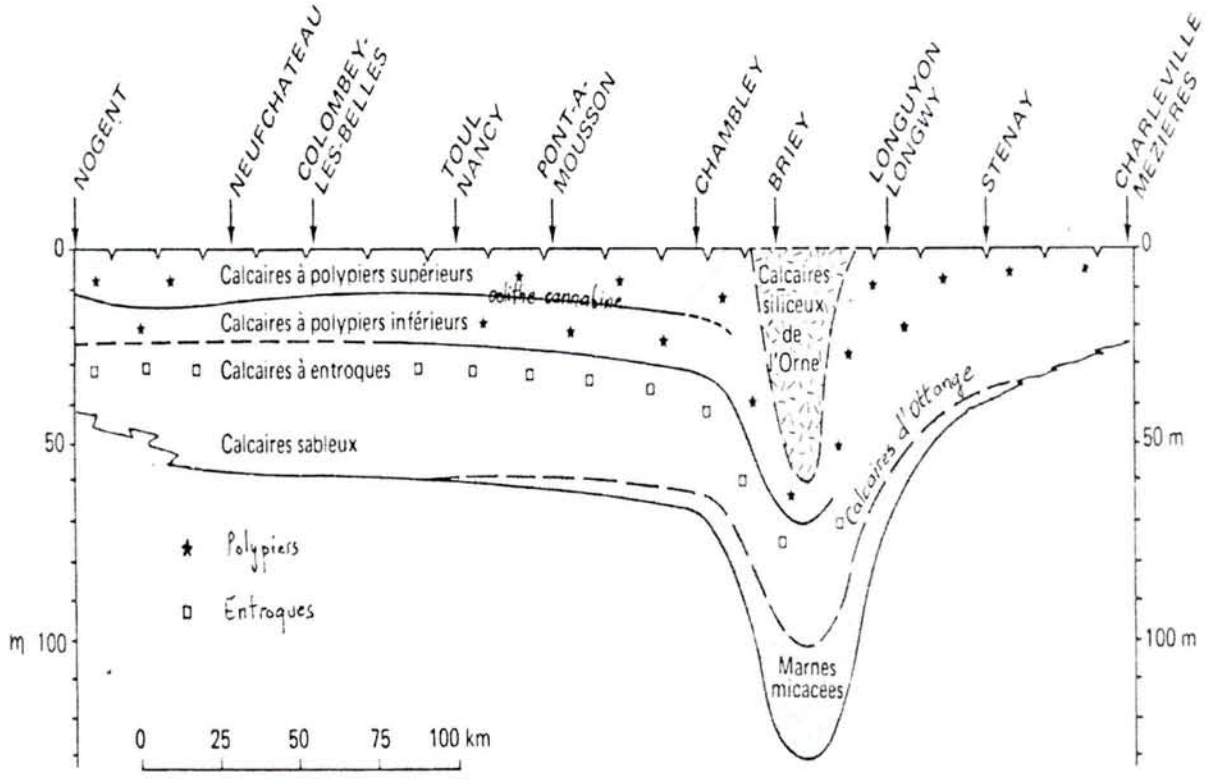


fig. 22-6: Séquence de l'oolithe miliaire inférieure

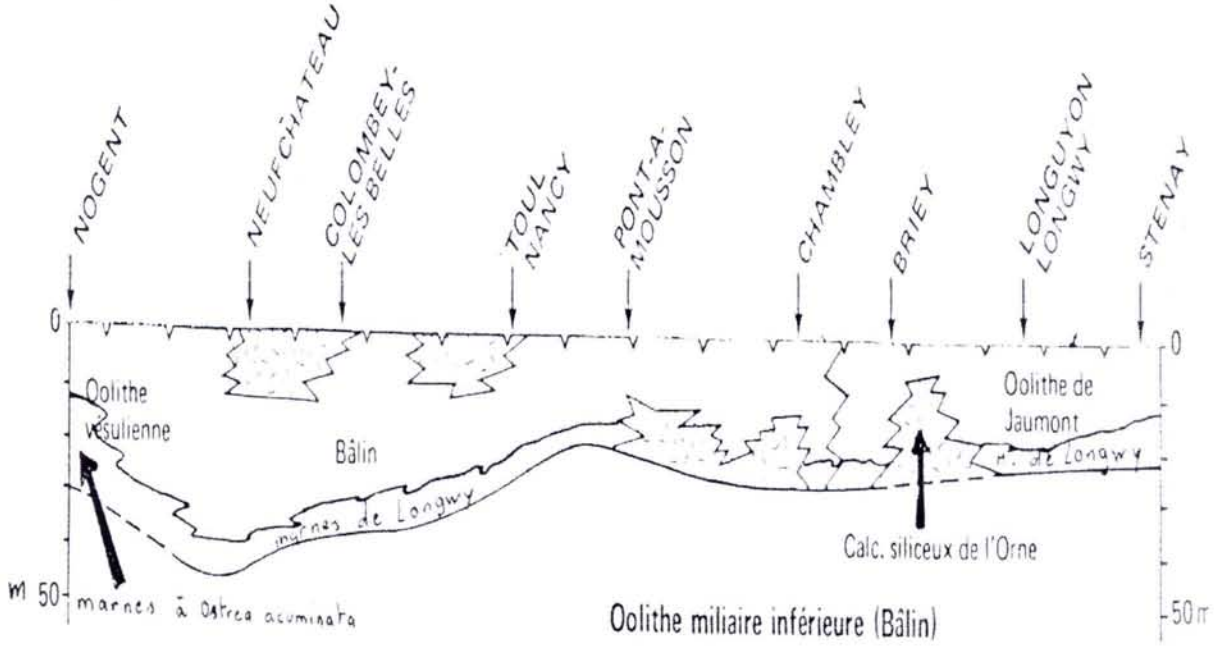


fig. 22-7: Séquence de l'oolithe miliaire supérieure

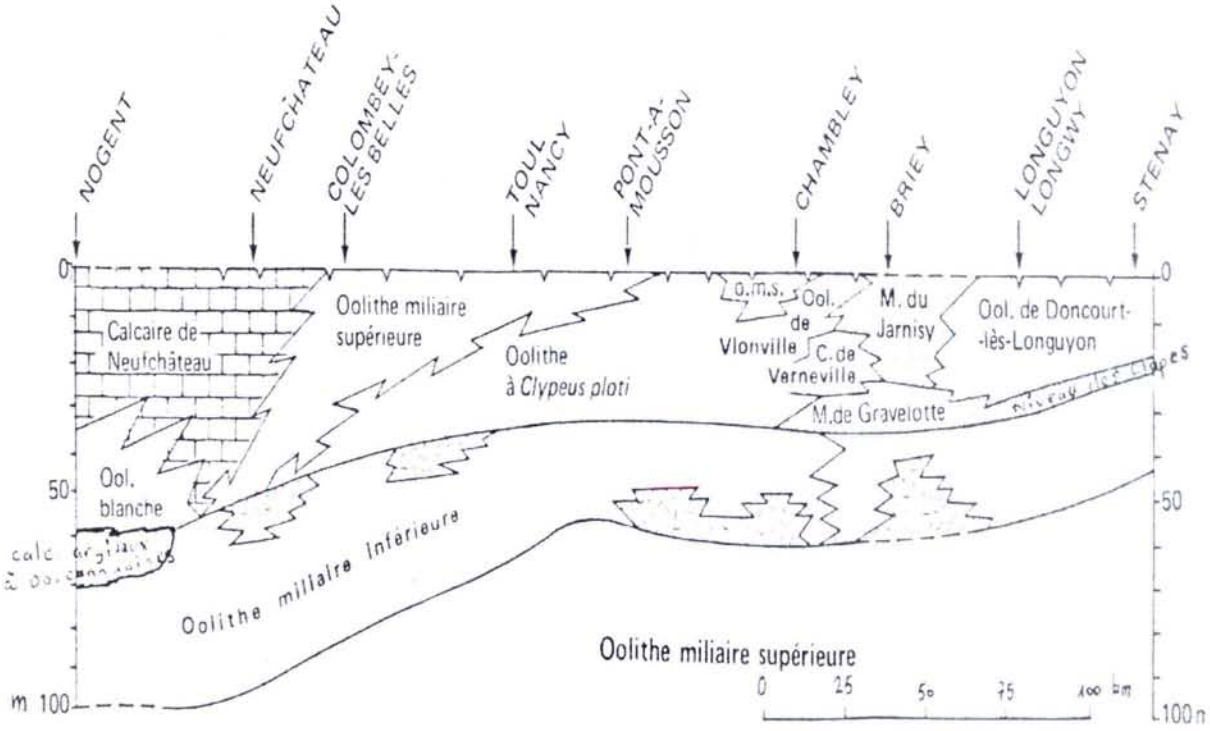
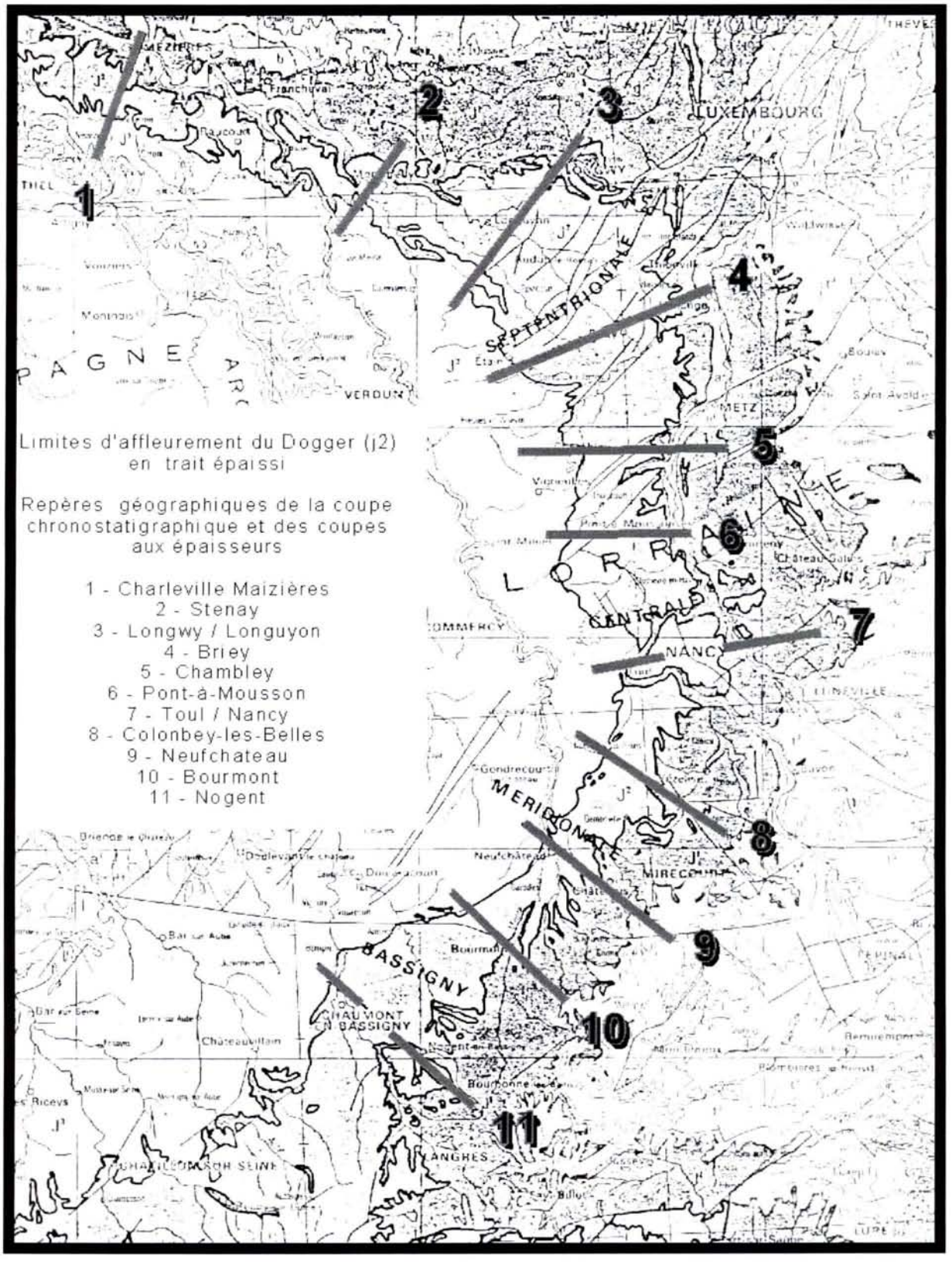


fig. 22-8: Extrait de la carte géologique de la France au 1/1000000 – 5e édition

Dessin sur la base de [***H-9***]



2234) Classification des lithofaciès dans le référentiel de Dunham : cas de la région de Nancy

Malgré les difficultés de synthèse, J. Castaing et D. Geisler donnent, pour la région de Nancy, un mode de classement intéressant quant à la présentation pratique des différents faciès du Bajocien. Nous n'avons pas trouvé d'études similaires pour les autres régions d'affleurement du Bajocien lorrain ; aussi, cette description sera l'unique référence que nous présenterons. Ces travaux sont très précis et peuvent probablement servir aussi de base de caractérisation des faciès des régions plus au nord et au sud de Nancy. Nous reprenons les principaux éléments de cette étude car ils sont en adéquation avec notre domaine de travail. De plus, ils démontrent que même à l'échelle locale, les différents faciès du Bajocien lorrain constituent un complexe comportant d'importantes variations latérales de faciès, ce qui invalide toute extrapolation.

La description des roches a été faite par l'observation des microfaciès, sur lames minces. La texture et les éléments inscrits sont les deux paramètres retenus pour classer les roches (***tab.22-2***). En croisant ces deux facteurs, les auteurs réalisent un tableau général permettant de classer toutes les roches rencontrées (***tab.22-3***).

La description de la texture des roches se fait sur la base de la classification de Duhnam complétée, éventuellement, des qualificatifs gréseux ou argileux. Les éléments inscrits sont au nombre de douze. Ils comportent les polypiers, les intraclastes, les bioclastes, les oolithes et la matrice.

tab. 22-2 : Textures et éléments inscrits dans les faciès des roches calcaires de la région de Nancy.

Textures (référentiel de Dunham)		Eléments inscrits	
B	Boundstone	**1**	Colonie de polypiers
G	Grainstone	**2**	Intraclastes
P	Packstone	**3**	Bioclastes mélangés, anguleux
Pt	Packstone gréseux	**4**	Bioclastes homogènes, anguleux
Pa	Packstone argileux	**5**	Bioclaste mélangés, roulés
W	Wackestone	**6**	Oolithes calcaires III
Wa	Wackestone argileux	**7**	Oolithes calcaires II
M	Mudstone	**8**	Oolithes calcaires I
		9	Oolithes ferrugineuses
		10	Pseudo-oolithe
		11	Pellétoïde
		12	Micrite

Le tableau suivant (***tab. 22-2***) reprend la synthèse proposée. Les cases remplies représentent les éléments effectivement rencontrés. Des photos de lames minces de chaque faciès complètent cette présentation. (***fig. 22-9***).

tab. 22-3 : Microfaciès principaux du Bajocien en fonction de leur texture et des éléments inscrits

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A										A 10		
T			T 3									
M												M 12
Wa										Wa 10		
W			W 3									
Pa,t											Pt 11	
P			P 3	P 4	P 5		P 7	P 8				
G						G 6						
B	B 1											

Les éléments carbonatés s'associent aux différentes textures (le numéro des colonnes est entre parenthèses) :

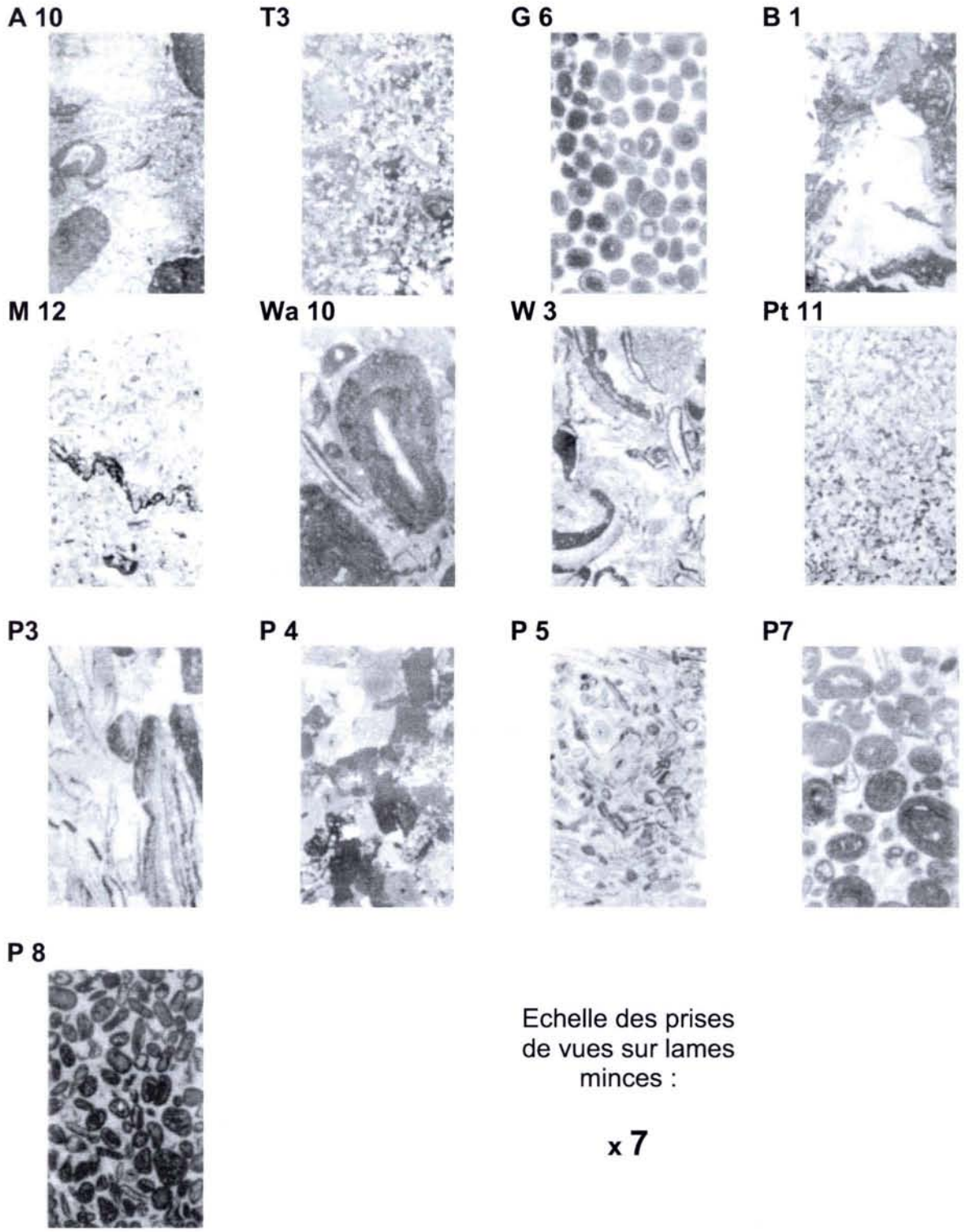
Les associations fréquemment observées sont les suivantes

- *Boundstone* : colonies de polypiers (1)
- *Grainstones* : intraclastes (2), bioclastes (3 et 5), oolithes (6)
- *Packstone* : intraclastes (2), bioclastes (3,4 et 5), oolithes (7,8 et 9), pseudo-oolithes (10) et pellétoïdes (11) avec une forte proportion de grains de quartz.
- *Wackestone* : tous les éléments à l'exception des oolithes ferrugineuses et des pellétoïdes.
- *Mudstone* : micrite (12)

Les faciès dominants ont une texture de type Packstone. Ils correspondent majoritairement aux calcaires oolithiques et à entroques. Les polypiers se positionnent en Boundstone.

fig. 22-9 : Planche photographique montrant le mode de classification des microfaciès du Bajocien lorrain, d'après les travaux de J. Castaing et D Geisler

Visualisation des microfaciès avec un faible grossissement



Echelle des prises de vues sur lames minces :

x 7

S.C.D. - U.H.P. NANCY 1
BIBLIOTHÈQUE DES SCIENCES
Rue du Jardin Botanique - BP 11
54601 VILLERS-LES-NANCY Cédex

2 – 3 CARACTERISTIQUES GEOMECANIQUES DES ROCHES DU BAJOCIEN LORRAIN

231) INTRODUCTION

Cette partie essentiellement bibliographique s'intéresse à la qualité des granulats issus de diverses exploitations situées dans les faciès calcaires du Bajocien lorrain. Plusieurs aspects sont abordés. Tout d'abord, nous rappelons les travaux de B. Haguenaueur [***I-1***] qui avance une relation entre la texture des roches tendres et les caractéristiques mécaniques intrinsèques des granulats. Ensuite, nous examinerons les travaux de P. Boëdec [***I-2***] sur l'inventaire « global » des caractéristiques des granulats calcaires du bajocien. Ses données seront alors complétées par celles issues du laboratoire Screg Est, afin d'aborder le problème de la variation spatiale des propriétés mécaniques des granulats calcaires.

232) TEXTURE DES ROCHES CALCAIRE ET PROPRIETES INTRINSEQUES DES GRANULATS

Des analyses au MEB [***I-1***] ont permis à B. Haguenauer de mettre en évidence une relation entre la texture des roches calcaires et les valeurs des essais LA et MDE. Selon cet auteur, la texture conditionne la résistance aux chocs et / ou à l'attrition d'une roche carbonatée.

Il montre en effet que les résultats de ces essais mécaniques est tributaire du taux de ciment calcitique. La calcite, qui cimente les divers grains constitutifs de la roche, est un minéral fragile. Elle est libérée par les chocs sous forme de cristaux de taille avoisinant 10 à 20 µm. D'autres particules peuvent accompagner cette « fillérisation », tels des grains oolithiques micrométriques, les argiles incluses dans la roche, etc.

Ce serait donc l'abondance de calcite dans la roche qui expliquerait les valeurs de LA et MDE élevées caractéristiques des calcaires tendres. Notons alors que cette calcite libérée

lors des opérations des malaxages et de mise en œuvre peut constituer aussi une auto fillérisation des mélanges, dont on pourrait tirer profit avec des liants adaptés.

Mais cette hypothèse dépend directement de la nature du calcaire et de la présence d'autres minéraux que la calcite. Par exemple, l'analyse granulométrique laser des fines issues de MDE, réalisée sur des gravillons classés E à F de Montois la Montagne montre que la taille des particules est inférieure à celle des éléments de calcite libérés dans les essais de B. Haguenaueur. Dans le cas présent, le D_{50} du passant à 1,6 mm est de 6 µm et le D_{75} à 12 µm. Donc, ici, seul un quart des produits libérés serait de la calcite. L'identification pétrographique de la roche montre en effet que les éléments plus fins proviennent d'un cortège d'éléments argileux et d'oxydes métalliques inclus dans la matrice...

233) CARACTERISTIQUES DES ROCHES DU BAJOCIEN LORRAIN

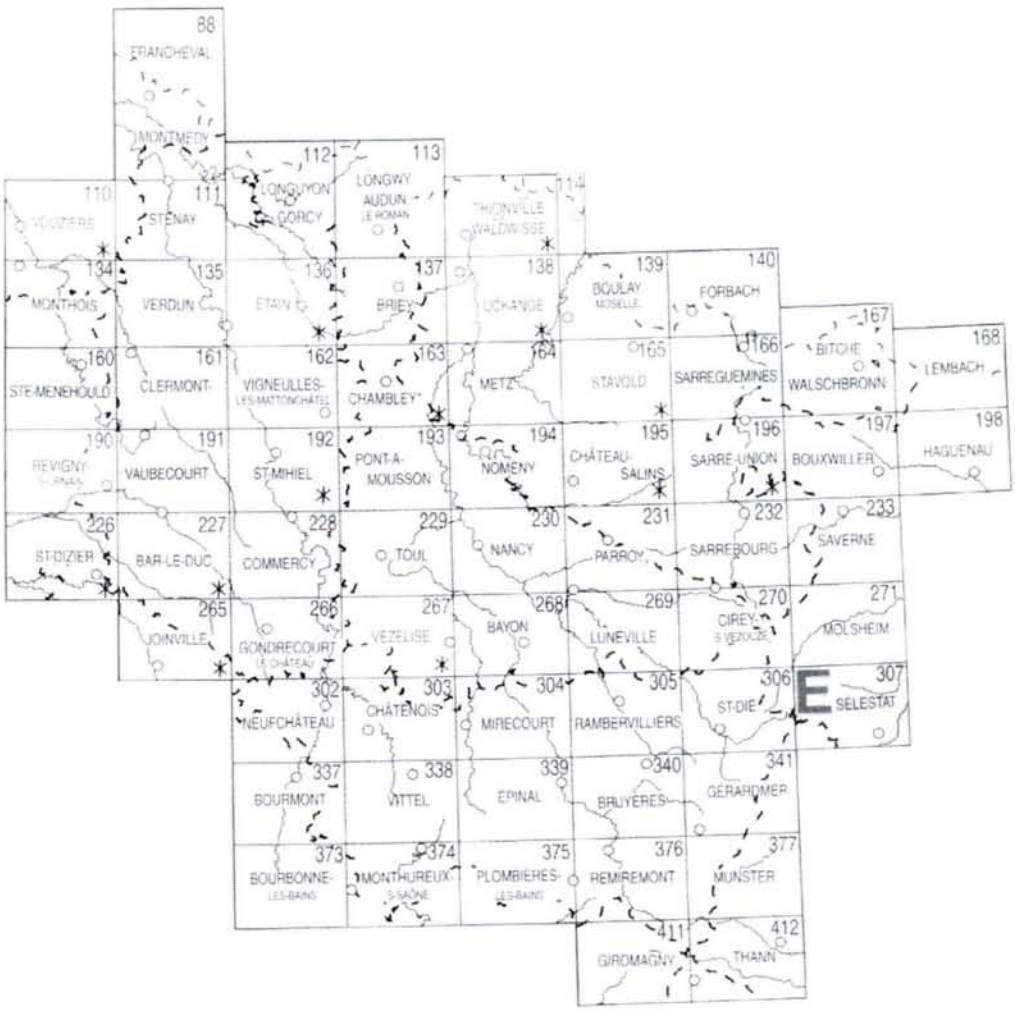
Ces caractéristiques sont mesurées sur des granulats issus de différents sites de production, dont une liste indicative est donnée ci-après. Elle permet de situer l'importance en nombre des exploitations présentes sur l'ensemble de l'affleurement des côtes de Moselle.

2331) Carrières de granulats calcaires en lorraine

Cet inventaire a été réalisé sur la base des données disponibles au BRGM de Nancy (code minier édition 1999). Cette liste ne tient compte que des sites déclarés en exploitation. Toutefois, du fait d'incessants rachats de sociétés, il se peut que l'exploitant cité dans le tableau suivant (tab. 23-1) ne soit plus d'actualité lors de la présentation de ces travaux.

Pour l'établissement de ce recensement, nous avons utilisé les cartes géologiques suivantes [***I -3***]: 302-303-137-163-193-229-230-267-113 (fig. 23-1).

fig. 23-1 : Recouvrement lorrain des cartes géologiques étudiées



Les sites d'exploitation des roches calcaires du Bajocien lorrain sont présentés dans le tableau suivant (***tab.23-1***).

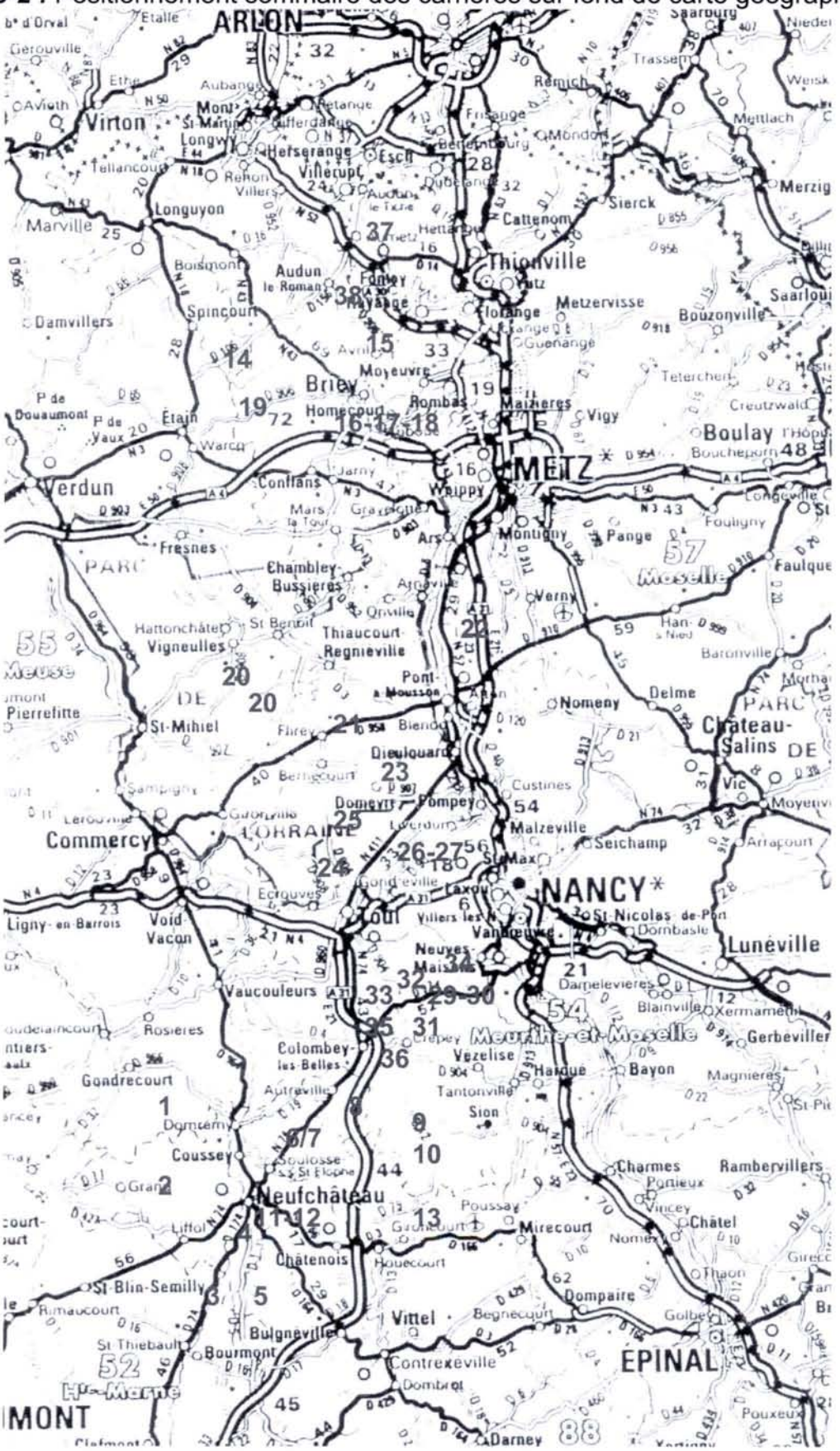
tab. 23-1 : Sites d'exploitation du calcaire du Bajocien lorrain sur la base des données de 1999 du BRGM de Vandoeuvre-lès-Nancy

N°	Carte	Titre	Planche	Coord. Lambert 1		Exploitant	Commune	Lieu dit
				X	Y			
1	302	Neufchâteau	3	844.950	83.850	Calin	Coussey	Les Grands Bois
2	302	Neufchâteau	1	848.550	82.100	Calin	Frébécourt	Champ Nonain
3	302	Neufchâteau	8	850.500	67.900	Sté routière et de dragage de l'est	Jainvillotte	Cens - Ban
4	302	Neufchâteau	8	851.100	71.000	Sarl Voirot Pierre	Landaville	Plusieurs carrières
5	302	Neufchâteau	8	853.500	68.500	Colas	Beaufremont	Les Vieux Fourneaux Sur Chergodin
6	303	Châtenois	1	858.650	82.100	Calin	Attignéville	Sous les Roches
7	303	Châtenois	1	858.700	83.850	Calin	Attignéville	Fin au Champ
8	303	Châtenois	2	861.750	85.700	BMV	Géménonville	Les Meulsons
9	303	Châtenois	3	869.400	85.200	Calin	Tramont Lassus	Le Grand Paquis
10	303	Châtenois	3	868.300	31.200	Choisel	Beuvezin	Carrière d'Aboncourt
11	303	Châtenois	5	854.100	71.700	Peduzzi	Landaville	Sur la Montagne
12	303	Châtenois	5	854.300	72.900	Colas	Rouvres la Chétive	La Lavière
13	303	Châtenois	8	876.500	73.700	Calin	Baudricourt	Les Venaiges
14	137	Briey	2	860.740	179.150	-	Lautefontaine	La Haie Godot
15	137	Briey	2	860.470	177.870	Habitants de la commune	Lautefontaine	-
16	137	Briey	4	869.850	177.150	SA Leclerc	Moyeuvre Grande	Côte de Malancourt
17	137	Briey	4	869.700	176.700	Socoman	Montois la Montagne	Forêt communale
18	137	Briey	8	871.300	173.200	Waglio	Roncourt	Forêt de Jaumont
19	137	Briey	8	870.900	172.700	Jean Lefèbvre	St Privat la Montagne	Aisele
20	137	Briey	7	863.400	174.380	-	Valleroy	-
21	193	Pont à Mousson	1	854.750	140.00	EJL Meuse Pianezzi	Essey et Maizerais	Les Vieilles Vignes
22	193	Pont à Mousson	3	867.600	139.400	Sté Lorraine Calcaire	Montauville	-
23	193	Pont à Mousson	4	871.150	146.800	CSRM Boulay	Bouxière sous Froidmont	La Côte
24	193	Pont à Mousson	8	876.900	129.900	Rollin SA Frouard	Belleville	Marbache
25	229	Toul	3	866.850	122.500	Redland Granulats	Villey St Etienne	-
26	229	Toul	3	868.450	124.200	Cogesud	Jaillon	Les grandes Haies

27	230	Nancy	1	880.950	120.300	GSM EST	Maxeville	Le Terril
28	230	Nancy	1	880.300	119.900	GSM EST	Maxeville	Les carrières
29	267	Vézelise	3	871.150	104.600	Ciments Vicat	Viterne	-
30	267	Vézelise	3	871.100	104.300	Cogesud	Viterne	Au jeu de quille
31	267	Vézelise	3	870.700	101.300	Lefevre	Germiny	Le Chauffour
32	267	Vézelise	4	874.500	106.200	Sté Lorraine calcaire	Maizières	Friche - Midy
33	267	Vézelise	4	875.600	106.500	Cogesud	Bainville sur Madon	Terre Vaine
34	267	Vézelise	6	861.950	86.200	SARL Michel Frères	Gémonville	Les Meulsons
35	267	Vézelise	7	876.100	95.250	Calin	Selaincourt	Le Semées
36	267	Vézelise	7	866.550	95.950	ONF	Crepey	Bois du Charme
37	113	Audun le Roman	3	864.700	200.900	Intermoselle SARL (Rumelange - Lux.)	Ottange	Billert
38	113	Audun le Roman	7	867.900	187.900	CEP	Knutange	La castine

Le positionnement schématique des carrières sur fond géographique complète la présentation du tableau 1. C'est l'objet du graphique suivant (***fig. 23-2***)

fig. 23-2 : Positionnement sommaire des carrières sur fond de carte géographique.



2332) Travaux de P. Boëdec ***[I-2]***

Dans son travail de DEA, P. Boëdec présente une étude des caractéristiques intrinsèques des matériaux du Bajocien dans sa partie orientale, entre Longwy et Langres, en termes de résistance aux chocs (coefficient Los Angeles *LA*) et à l'attrition (coefficient micro-Deval humide *MDE*).

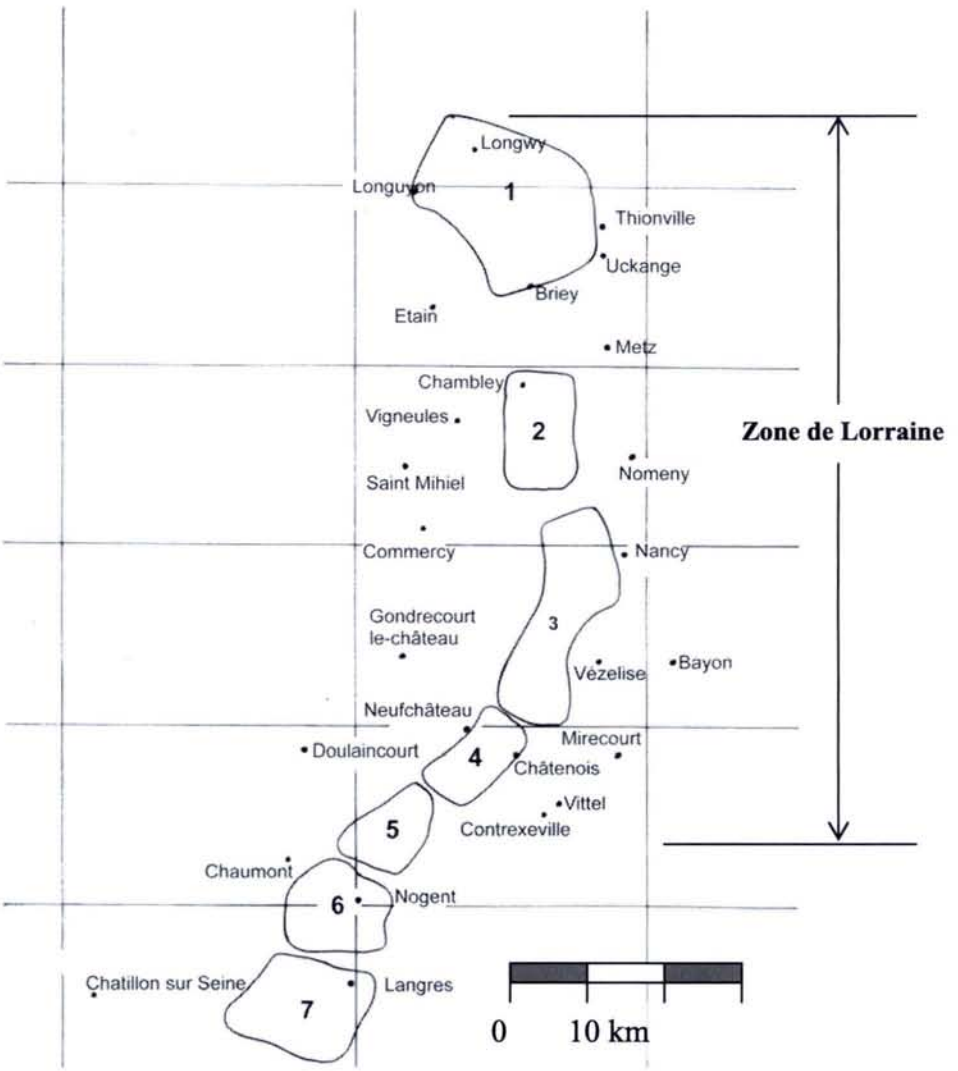
A ses résultats, nous ajouterons les valeurs de porosité (n) à notre disposition afin de former une base de données aussi exhaustive que possible.

L'ensemble permet d'avoir une première connaissance des caractéristiques géomécaniques propres à un faciès déterminé. Boëdec dégage ainsi des zones où les propriétés des roches peuvent être considérées assez homogènes.

Sept secteurs « homogènes » sont proposés par Boëdec (***fig.23-3***) :

- 1 – Longuyon / Longwy / Briey,
- 2 – Chambley / Pont-à-Mousson,
- 3 – Toul / Gémonville,
- 4 – Aouze / Neufchâteau / Châtenois,
- 5 – Bourmont / Clefmont,
- 6 – Nogent en Bassigny / Dampierre / Rolanpont,
- 7 – ouest et sud de Langres

fig. 23-3 : zones « homogènes », selon Boëdec [***I-2***]



A ces données, nous ajoutons celles disponibles à Screg Est. Elles complètent les informations relatives aux zones 1-2-3-4

Toutes les valeurs sont reprises dans le tableau suivant (***tab. 23-2***)

tab. 23-2 : Synthèse des valeurs de LA et de MDE relatives aux granulats calcaires du Bajocien lorrain (P. Boëdec et Screg Est)

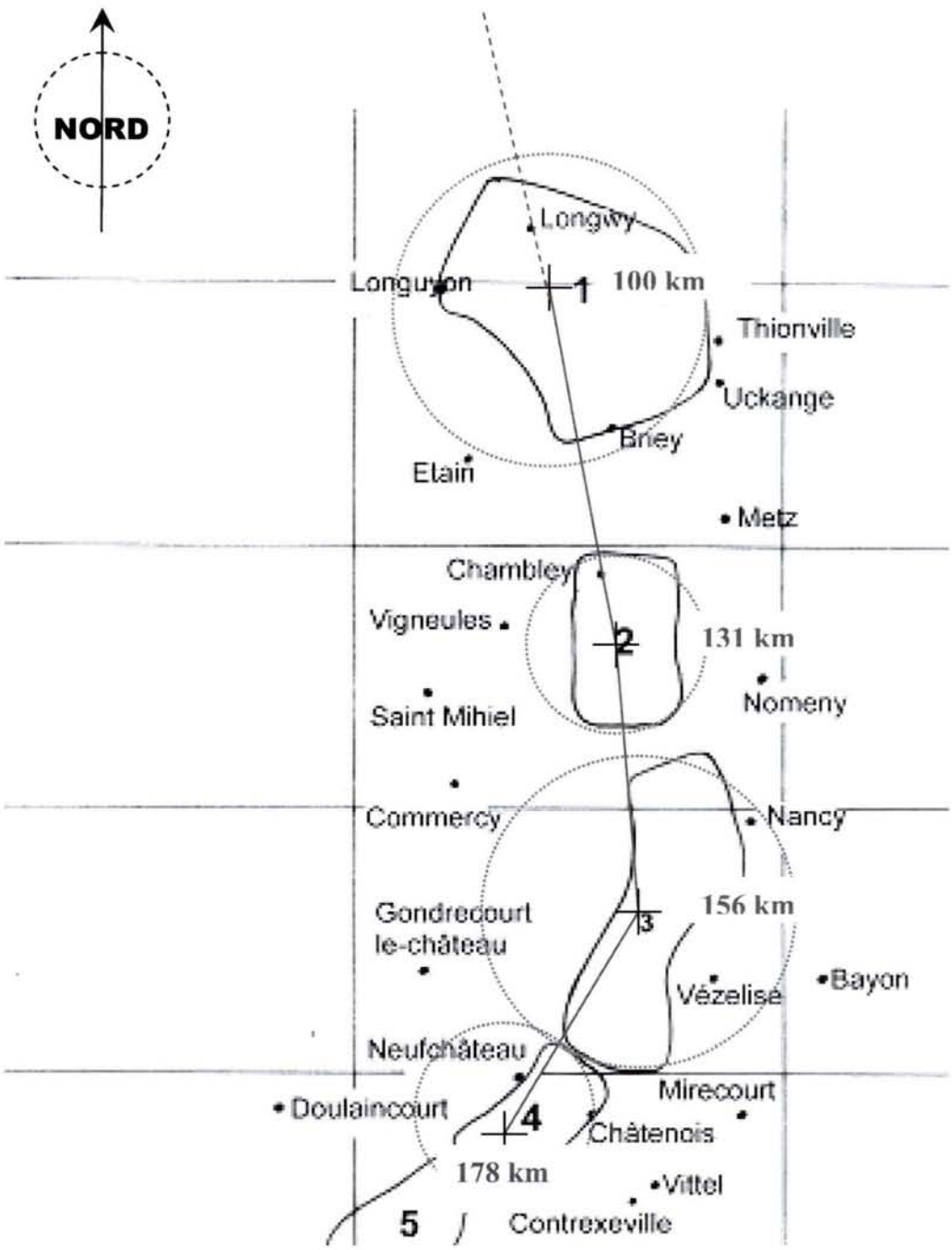
Zone	Lieu	Roche	LA	MDE	MDS	n	Remarques
1	Maloncourt la Montagne	Oolithe de Jaumont	44	75	-	15	
	Maloncourt	Calcaire siliceux de l'Orne	28	33	-		
	CD 15	Calcaire à polypiers supérieurs	37	66	19	14	
	Knutange	Calcaire	24	24			
	Knutange	Calcaire du Haut Pont	28	32			Knutange
	CD 15		36	62	18	13.5	
	Echrange	Calcaire d'Ottange	37	70	18	15	Echrange
			62	78	12	16	Volmérange
2	RN 64 - Jaulny	Bâlin*	38			6	Niveau sup.
			25				Niveau inf.
	Norroy	Calcaire à polypiers supérieurs	32	36		9	
	Lorry - Mardigny	Calcaires à polypiers inférieurs et entroques	35	53		9	
3	Bicqueley	Oolithe miliaire supérieure	44	86	20	17	
	Tranqueville		29	36	13	9	
	Jaillon		55	57			
	Selaincourt	Bâlin*	24	29	8	9	
	Champs le Boeuf		28				
	Harmonville		27	38		9	
	A 33 - tranchée	Polypiers supérieurs	41	> 40			
	Favière		23	21			
	Battigny		29				
	Viterne		36	34	11	8	Ancien site
		Polypiers inférieurs à supérieurs	33	32			Site en exploitation
		Polypiers inférieurs	21	22	8	3	
		Oolithe cannabine	27	37	10	8	
	A 33		33	>40			
	Viterne	Polypiers inférieurs	28	35	9	7	
	Crepey		28	33	11	7	
	A 33		27	28	1 à 6		Sondage
			27	30			Tranchée
	Viterne	Oolithe blanche	22	26	8	6	
	A 33		33	36			
	A 33 - sondage		35	30	9		
	Viterne	Calcaire à entroques	22	26	8	6	
	A 33		32	41	8		
4	Circourt / Mouzon	Calcaire gréseux	26	27			
	Courcelles / Chatenois	Polypiers supérieurs	25	26		6	
	Beaufremont	Polypiers supérieurs	26	23			
	Harchéchamps		28	26			
	Pompierre		35	32			
		Oolithe canabine	30				
		Polypiers inférieurs	24	21			
	Rouvres		27	29		5	
	Châtenois		23	30			
	Removille	Calcaire gréseux et à entroques	37	40		7	
	Rouvres		27	31			
	châtenois		27				
	Courcelle / châtenois		25	34			
	Châtenois	Calcaire à entroques	27	37			
	Removille		30	39		6	

(*) Bâlin : oolithe miliaire inférieure

Ces données nous ont permis de construire, pour les régions 1,2,3 et 4, des graphiques avec, en abscisse, la distance entre centre de zone et, en ordonnées, la valeur de LA ou

de MDE. Les centres de zones ont été définis approximativement. La zone 1 commence arbitrairement au km 100. L'abscisse est orientée nord-sud (***fig. 23-4***).

fig. 23-4 : positionnement sommaire des abscisses des centres des zones homogènes



Variation géographique des caractéristiques intrinsèques LA et MDE

Le traitement de ces données permettra de valider ou non la notion de zones homogènes définies par P. Boëdec. Sur les graphiques (***fig. 23-5 et 23-6***) sont portées les valeurs moyennes des coefficients LA ou MDE, avec leurs écarts types.

fig. 23-5 : Correspondance Régions / Coefficient Los Angeles

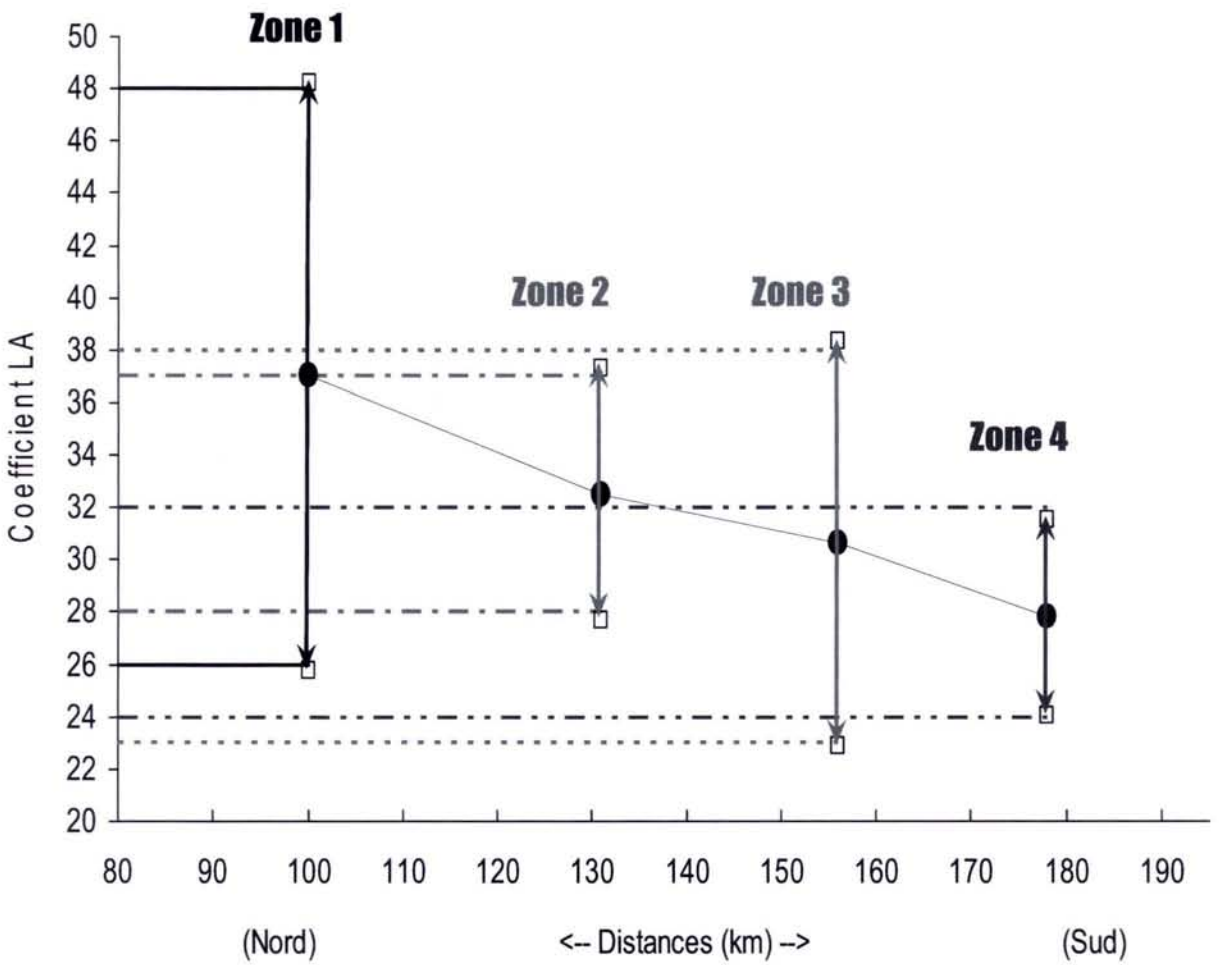
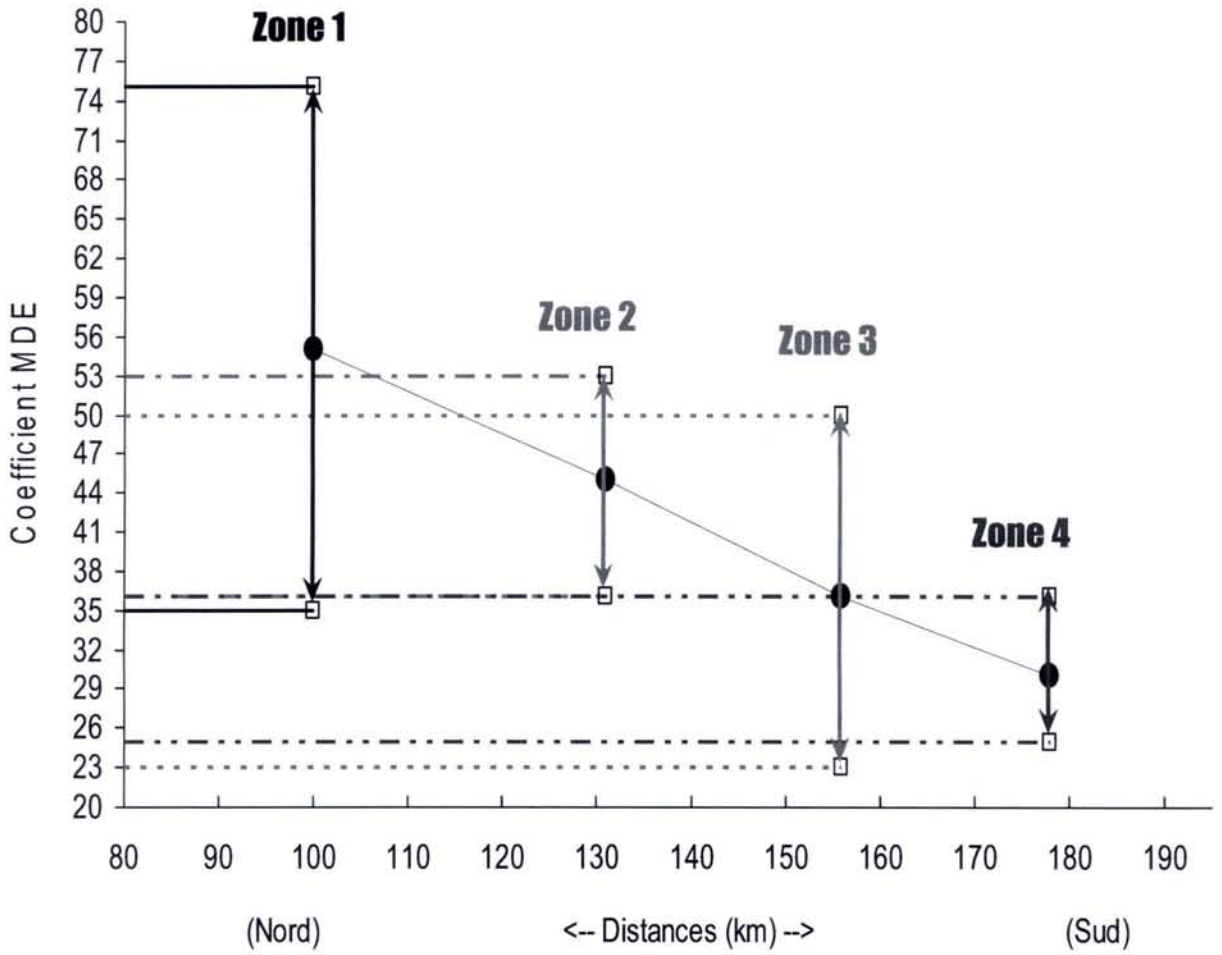


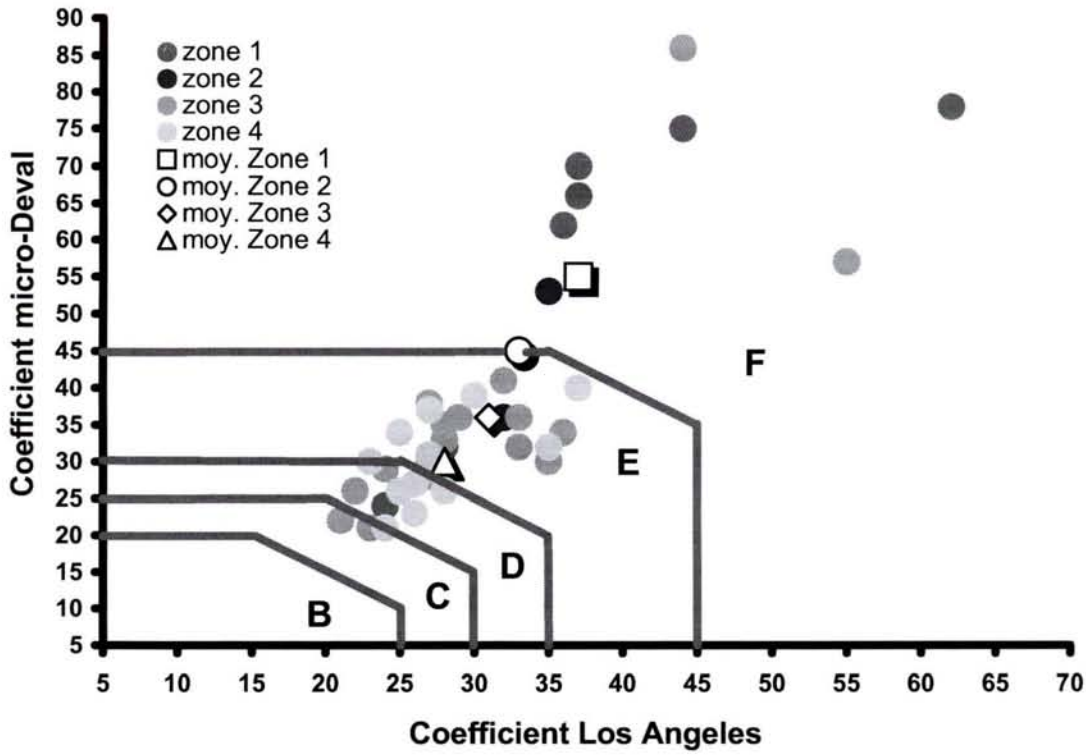
fig. 23-6 : Correspondance Régions / Coefficient micro-Deval Humide



On constate qu'il existe une amélioration régulière des performances moyennes, du nord au sud. Mais les écarts types sont tels que la notion de zones nettement différenciées paraît peu défendable, puisque les plages de données se recouvrent singulièrement, notamment pour les zones 2 et 3. Seules les régions 1 et 4 apparaissent bien distinctes, en particulier pour le MDE avec les meilleures performances dans le sud de la Lorraine. Toutefois, dans la zone 1, il existe des faciès donnant des performances intéressantes.

Les valeurs de LA et MDE ont été reportées dans le graphique de la norme française XP P 18-540 (article 7.1) (***fig.23-7***). Les valeurs individuelles sont figurées par des ronds. Les moyennes par des symboles vides.

fig. 23-7 : Classification des gravillons XP P 18-540 § 7.1 et superposition des caractéristiques des granulats calcaires du Bajocien lorrain (Régions 1 à 4)



Les zones 2,3 et 4 se positionnent en catégorie E des gravillons. La région 1 est très nettement en F. On confirme ainsi la première analyse des données : les matériaux du nord sont plus tendres que ceux des régions sud.

Toutefois, les variations verticales et latérales de faciès de ce complexe carbonaté (voir les écarts types) montrent qu'il existe localement des matériaux de meilleure ou de moindre qualité. Par exemple, une étude relative à la carrière de Viterne (54) [***I-4***] montre que sur un même front de taille, une exploitation sélective des différentes couches permet d'obtenir des granulats classés de D à F.

En terme de classification routière, cette analyse à grande échelle conduit à classer les calcaires du Bajocien en deux zones :

- Au nord, des matériaux « hors normes » a priori.
- Au centre et au sud, des matériaux utilisables en techniques routières.

Signalons toutefois qu'en présence d'un liant hydraulique adapté, des matériaux de médiocre qualité (classe F) peuvent donner des performances acceptables (comme le montrent certains travaux qui suivent)

Variation géographique du LA et du MDE en fonction des faciès différenciés

Nous reprenons ici toutes les données disponibles (12 faciès différenciés) pour examiner les valeurs des coefficients LA et MDE en fonction de la position géographique des carrières (ou lieux d'emprunt), et pour chacun des différents faciès de roche. La dénomination des roches des tableaux suivants (***tab.23-3*** et ***tab.23-4***) est reprise des travaux de P. Boëdec. Les données sont reportées sur des graphiques (***fig.23-8***) ayant pour abscisses les zones géographiques et pour ordonnées les coefficients LA et MDE.

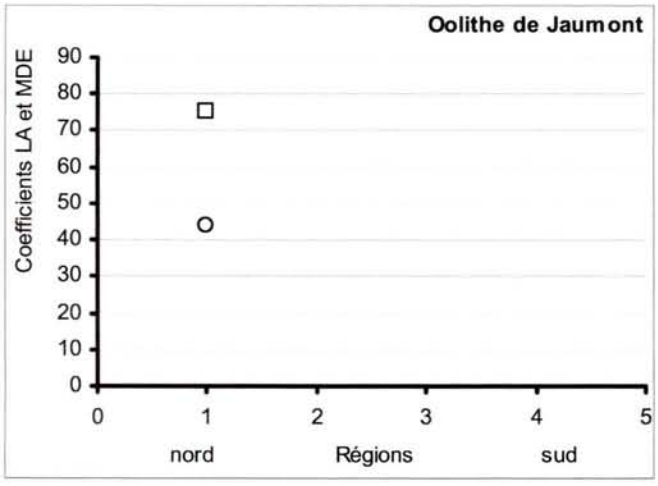
tab.23-3 : Variation des valeurs des coefficients LA en fonction des régions et des faciès

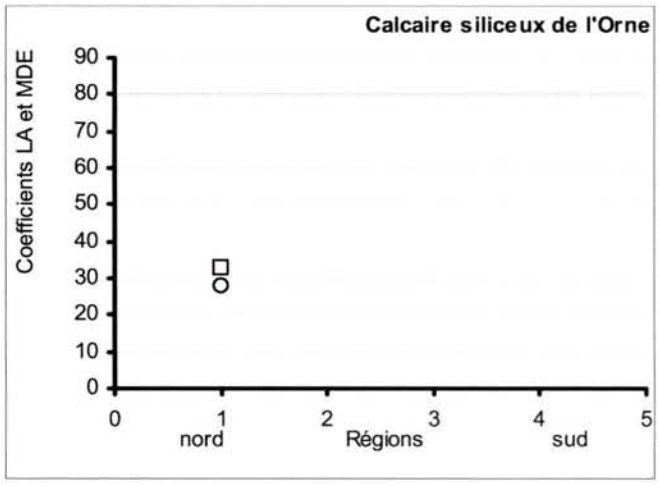
		Région d'exploitation – Valeur des coefficients Los Angeles (LA)			
N	**Roches**	**1**	**2**	**3**	**4**
1	Oolithe de jaumont	44			
2	Calcaire siliceux de l'Orne	28			
3	Calcaires du Haut Pont	28-36			
4	Calcaire d'Ottange	37-62			
5	Bâlin (oolithe miliaire inférieure)		38-25	24-27-28	
6	Oolithe miliaire supérieure		44-29-55		
7	Polypiers supérieurs	37	32	41-23-29-36	25-26-28-35
8	Polypiers inférieurs		35	33-21-28-28-27-27	24-27-23
9	Oolithe cannabine			27-33	30
10	Oolithe blanche			22-33-35	
11	Calcaire à entroques			22-32	27-30
12	Calcaires gréseux				26-37-27-27-25

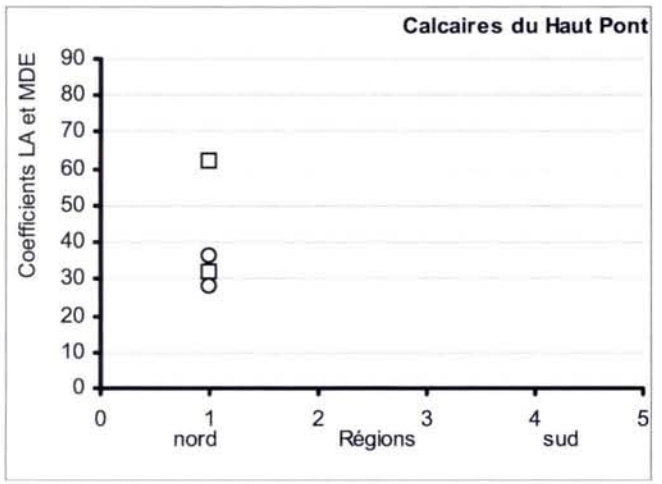
tab. 23-4 : Variation des valeurs des coefficients MDE en fonction des régions et des faciès

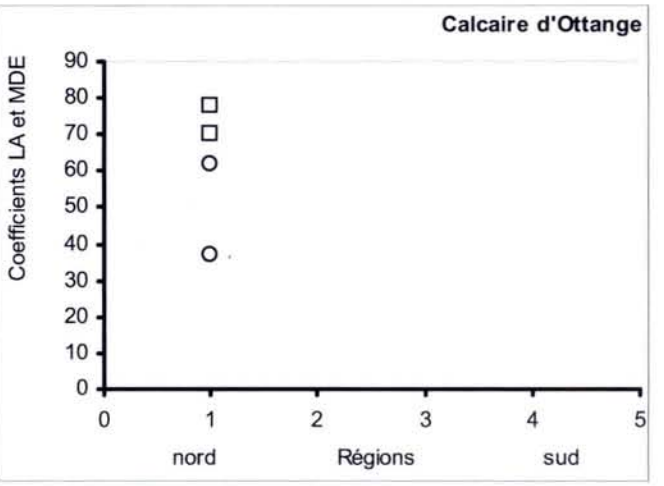
		Région d'exploitation – Valeur des coefficients micro-Deval (MDE)			
N	Roches	1	2	3	4
1	Oolithe de jaumont	75			
2	Calcaire siliceux de l'Orne	33			
3	Calcaires du Haut Pont	32-62			
4	Calcaire d'Ottange	70-78			
5	Bâlin (oolithe miliaire inférieure)			29-38	
6	Oolithe miliaire supérieure			86-36-57	
7	Polypiers supérieurs	66	36	40-21-34	26-23-26-32
8	Polypiers inférieurs		53	32-22-35-33-28-30	21-29-30
9	Oolithe cannabine			37-40	
10	Oolithe blanche			26-36-30	
11	Calcaire à entroques			26-41	37-39
12	Calcaires gréseux				27-40-31-34

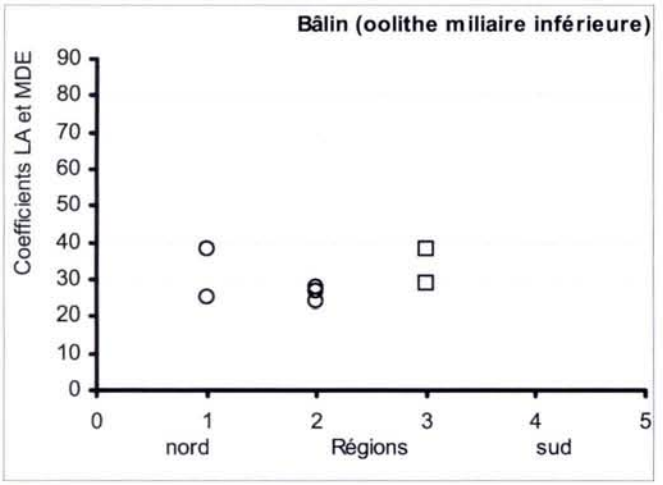
fig. 23-8 : Graphiques relatifs aux coefficients Los Angeles et micro-Deval par régions et par faciès. (ronds : valeurs de LA – carrés : valeurs de MDE)

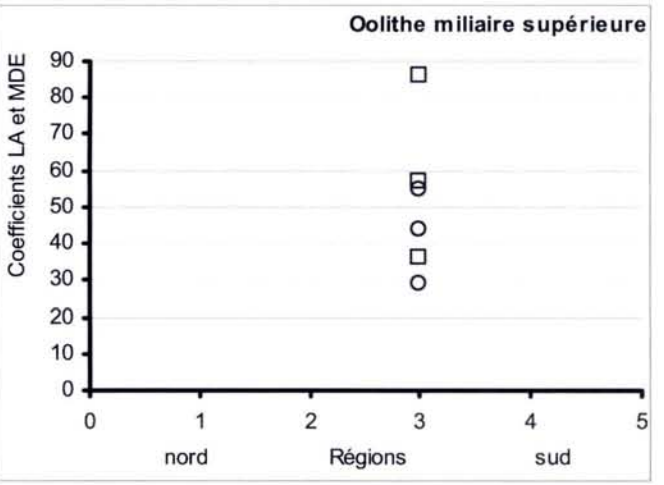


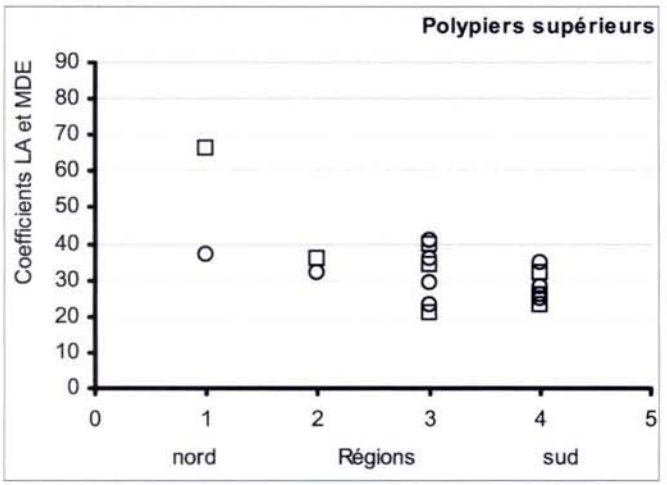


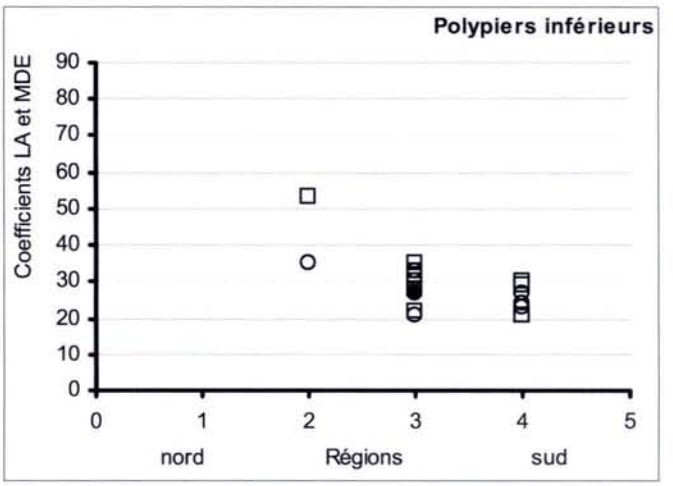

Calcaires du Haut Pont
Coefficients LA et MDE
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90
0 1 2 3 4 5
nord
Régions
sud

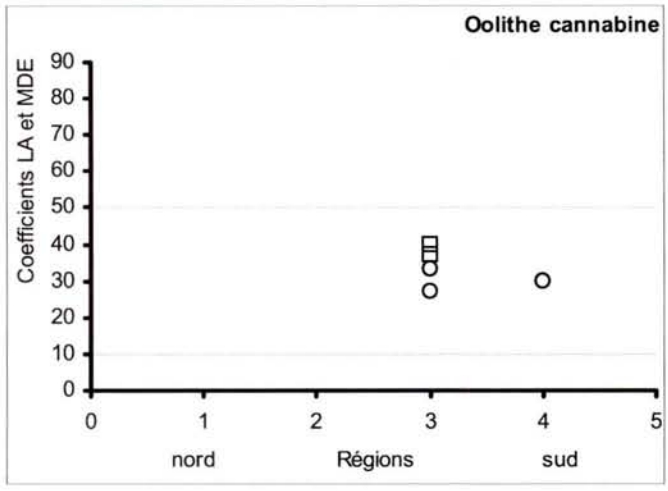

Calcaire d'Ottange
Coefficients LA et MDE
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90
0 1 2 3 4 5
nord
Régions
sud

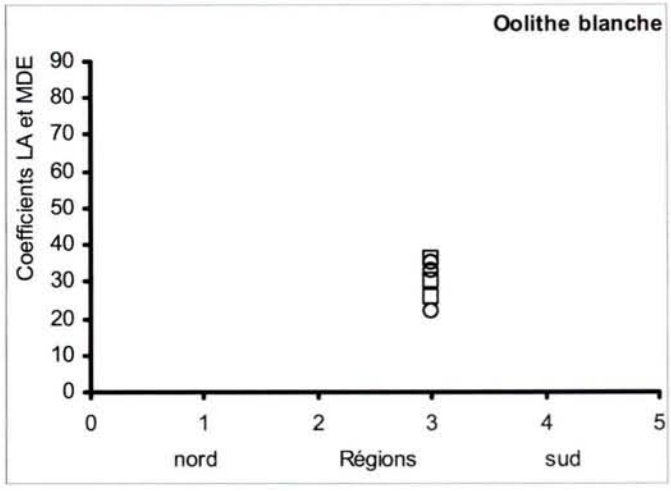

Bâlin (oolithe miliaire inférieure)
Coefficients LA et MDE
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90
0 1 2 3 4 5
nord
Régions
sud

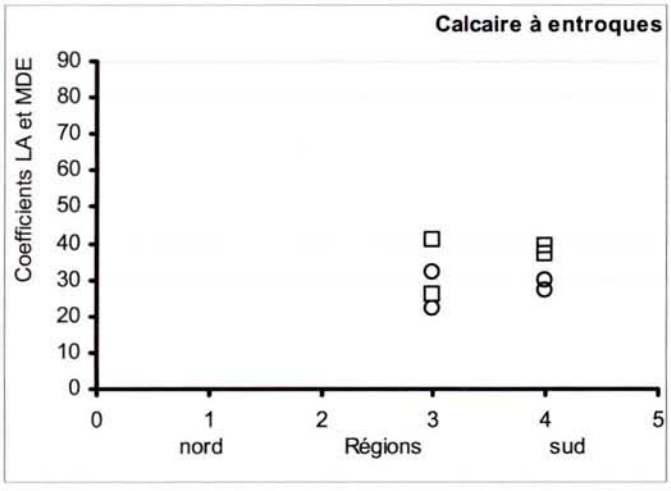

Oolithe miliaire supérieure
Coefficients LA et MDE
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90
0 1 2 3 4 5
nord
Régions
sud

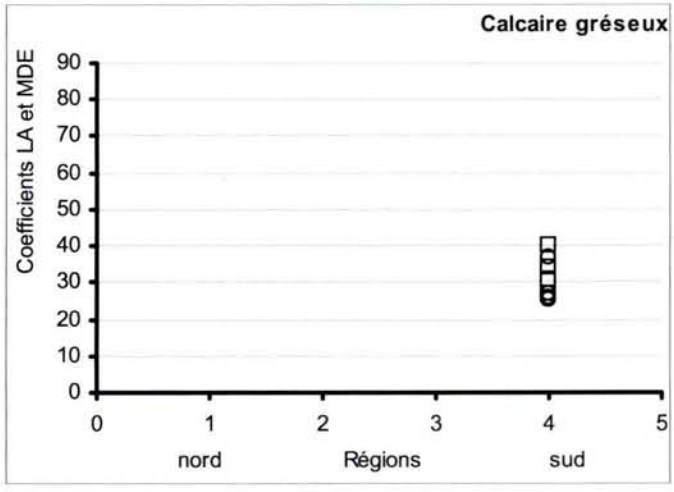

Polypiers supérieurs
Coefficients LA et MDE
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90
0 1 2 3 4 5
nord
Régions
sud


Polypiers inférieurs
Coefficients LA et MDE
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90
0 1 2 3 4 5
nord
Régions
sud









234) CONCLUSION

Cette analyse montre finalement que la qualité des roches exploitées varie très sensiblement, non seulement selon les faciès, mais aussi selon les régions, ce qui génère une difficulté de suivi de la qualité mécanique des roches (au sens routier) le long de l'affleurement calcaire du bajocien. Par ailleurs, le nombre d'échantillons à disposition par région, pour un faciès donné, est plutôt faible, ce qui limite la portée de cette analyse. Seule une image globale peut être restituée.

La conclusion que je propose est la suivante : une tendance se dessine quant à la l'amélioration des propriétés des granulats en allant du nord au sud de la Lorraine, par le simple fait que la nature des roches carbonatées exploitées n'est pas la même (voir les coupes décrivant les différentes phases sédimentaires établies par J. Leroux).

Pour ce qui concerne l'homogénéité des roches (sur un secteur délimité), cette notion est à discuter : je pense que l'on peut déclarer qu'une zone est « homogène » lorsque les écarts des mesures relatifs à la moyenne sont faibles ou tout au moins raisonnables.

Par ailleurs, la réalité pratique d'exploitation des roches du Bajocien lorrain interdit la notion d'homogénéité. En effet, lorsqu'on extrait des matériaux d'une carrière, cela s'effectue sur un site donné, avec une nature de front de taille précis (ce qui n'exclut pas une variation verticale de faciès) ; or, si on interprète sommairement les travaux de P. Boëdec, cela revient à devoir mélanger différents gisements pour obtenir une valeur moyenne, ce qui est irréaliste.

Enfin, la notion importante à retenir est qu'il ne faut pas mélanger l'échelle du niveau d'étude. En effet, à l'échelle de la région, seules des tendances peuvent être données. En revanche, au niveau de la carrière, l'approche relève de l'échelle locale.

Du fait des variations latérales de faciès, on ne peut pas s'appuyer sur l'échelle régionale pour estimer le faciès local.

Toutefois, les études menées par Boëdec permettent de bien connaître les caractéristiques des roches en fonction de leurs faciès et c'est là que réside tout l'intérêt de ses recherches. Cette étude est unique (à notre connaissance) en ce qui concerne notre région.

PARTIE 3

EXPRIMENTATIONS

3 – 1 RELATION ENTRE LES PROPRIETES MECANIQUES DES ROCHES ET DES GRANULATS

311) INTRODUCTION

Dans le domaine routier, les granulats sont caractérisés d'un point de vue mécanique par les coefficients LA et MDE. Or, il existe peu de valeurs publiées dans la littérature, pour les calcaires lorrains notamment. Aussi, nous a-t-il paru important de mettre à disposition, dans ce mémoire, les valeurs fiables issues de notre base de données. Elles concernent aussi bien les calcaires que les autres matériaux.

Pour les calcaires, il n'a pas été possible de mettre à profit le classement de Dunham proposé précédemment, car nous ne disposions pas du matériel d'analyse requis (lames minces, etc.) Seule une appellation simplifiée est reportée dans les tableaux qui suivent. Notons toutefois que dans le cadre de la normalisation européenne pour le marquage CE des granulats de construction, la qualification pétrographique de la roche, d'où provient le granulat, devient une nécessité. Ces travaux pourront alors être considérés comme un préliminaire dans ce cadre.

Cette base de données servira ensuite à différents traitements statistiques, et de référentiel pour des études performancielles (voir la partie du document relative aux publications).

Dans le cas présent, ces données sont reportées dans le diagramme LA, MDE de l'article 7 de la norme XP P 18-540, afin de dégager d'éventuelles tendances.

Ces performances sont aussi comparées aux résistances mécaniques moyenne en compression des roches, telles qu'annoncées dans l'ouvrage de Arquié et Tourenq [***J-1***]. Il en résulte que toute généralisation concernant les calcaires est souvent infondée.

En retour, la mesure des performances en traction peut s'avérer intéressante.

312) CARACTERISTIQUES LA et MDE DES GRANULATS. BASE DE DONNEES POUR LA REGION EST DE LA FRANCE

Les premières valeurs publiées par P. Boëdec [***J-2***] sont ici largement complétées par les données recueillies au laboratoire Screg Est. Elles forment une base de données comprenant près de 100 sites d'échantillonnage. Ces données sont listées dans le tableau suivant (***tab.31-1***) qui comprend, pour chaque nature « générique » de matériaux :

- La nature de la roche
- Le mode de gisement
- Pour les calcaires, le faciès de la roche lorsqu'il est connu (cf. § 2.4)
- Le nom du site d'extraction
- Les valeurs des performances mécaniques intrinsèques (LA, MDE)

tab. 31-1 : base de données générale de couples de valeurs LA et MDE

Nature de la roche	**Gisements** A : alluvionnaire M : massif	**Faciès**	**Sites**	**LA**	**MDE**
Calcaire	M		Avrigney	28	13
	M		Jeanin	23	13,5
			Houtaud	25	16,5
	M		Comblanchien	25,5	12,5
	A		Courlandon	40	51
	A		Darcey	18	18
	A		Dijon granulats	24	15
	A		Douzy	28	26
	M		Givet	20	19
	M		Gudmont	24	20
	M		Epagny	29	24
	M		Jaillon	53	65
	M		Marsannay Le Bois	24	14
	A		Matignicourt	24	13
	A		Mairy sur Marne	26	14
	A		Cheppes la Prairie	28	12
			Matougues	27	12
	A		Périgny	27	14
	A		Saint Eloi	28	18
	A		Orconte	29	13
	A		Cloyes	20	13
	M		Pessan	22	15
			Saint Usage	24	22
	M		Rouvres la Chétive	31	25,5
			Arcey	27	24,5
	M		Semoutier	26	17
	M		Montois la Montagne	58	83
	M		Montois la Montagne	38	45

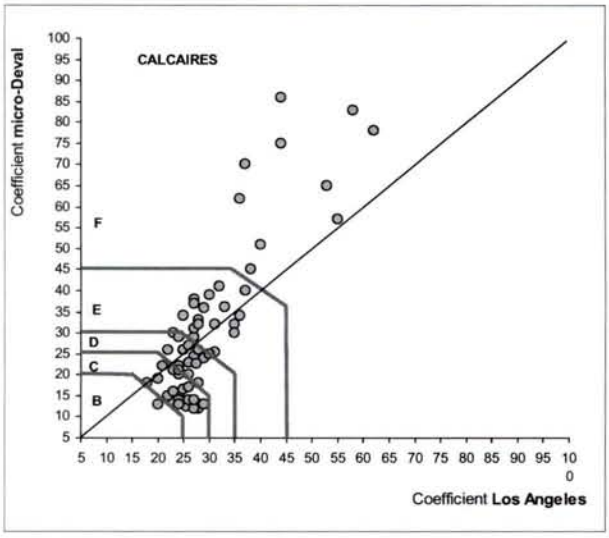
			Virey sous Bar	27,5	22,5
	M		Voulaine	26	20
	M		Vignory	23	16
	M		Viterne	31	32
	M		Wallers	30	25
	M	Oolithe de Jaumont	Maloncourt la Montagne	44	75
	M	Calcaire siliceux de l'Orne	Maloncourt	28	33
	M	Calcaire du Haut Pont	Knutange	28	32
	M	Calcaire du Haut Pont	CD 15	36	62
	M	Calcaire d'Ottange	Echrange	37	70
	M	Calcaire d'Ottange	Echrange	62	78
	M	Oolithe miliaire inférieure	Selaincourt	24	29
	M	Oolithe miliaire inférieure	Harmonville	27	38
	M	Oolithe miliaire supérieure	Bicqueley	44	86
		Oolithe miliaire supérieure	Tranqueville	29	36
	M	Oolithe miliaire supérieure	Jaillon	55	57
	M	Polypiers supérieurs	Favière	23	21
	M	Polypiers supérieurs	Viterne	36	34
	M	Polypiers supérieurs	Courcelles / Chatenois	25	26
	M	Polypiers supérieurs	Beaufremont	26	23
	M	Polypiers supérieurs	Harchéchamps	28	26
		Polypiers supérieurs	Pompierre	35	32
	M	Polypiers inférieurs	Viterne	21	22
		Polypiers inférieurs	Pompierre	24	21
	M	Oolithe blanche	Viterne	27	29
	M	Polypiers inférieurs	Châtenois	23	30
	M	Calcaire à entroques	Châtenois	27	37
	M	Calcaire à entroques	Viterne	22	26
	M	Oolithe blanche	A 33	33	36
	M	Oolithe blanche	A 33 - sondage	35	30
	M	Calcaire à entroques	Viterne	22	26
	M	Calcaire à entroques	A 33	32	41
	M	Calcaire à entroques	Châtenois	27	37
		Calcaire à entroques	Removille	30	39
		Calcaire gréseux	Circourt / Mouzon	26	27
		Calcaire gréseux et à entroques	Removille	37	40
	M	Calcaire gréseux et à entroques	Rouvres	27	31
		Calcaire gréseux et à entroques	Courcelle / Châtenois	25	34
siliceux	A		Cantrelle	22	9
	A		Dambenois	11	7
	A		La Chapelle dvt Bruyères	25	12
	A		Rosière aux Salines	28	7
	A		Fraimbois	21	9
	A		Velle sur Moselle	24	7
	A		Vigneulles	22	8
			(Roye)	16,5	16,5
			Saint Loup	26	13
			Faverney	20,5	13,6
			Fleurey	21	14
	A		Bonnal	16	13
silico-calcaire	A		Autrey	25	9
	A		Velet	21	11

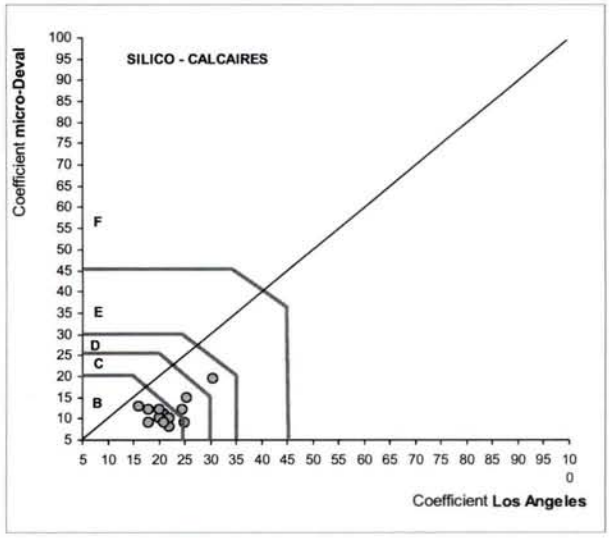
	A		Nogent sur Seine	25,5	15
	A		Pont à Mousson	22	8
	A		Nordhouse	22	10
	A		Plichancourt	20	10
	A		Hoerdt	21	9
	A		Herrlisheim	18	12
	A		Saint Léonard	18	9
	A		Eschau	20	12
	A		Athis	30,5	19,4
	A		Saint Vit	24,5	12
Porphyre	M		Moissey	14,5	6,5
	M		Lessine (Belgique)	12	6
Quartzite	M		Dhordain	12	14
	M		Düro (Allemagne)	16	8
Rhyolite	M		Corbigny	16	5,5
	M		Saint Nabor	13	4
Tuf rhyolitique	M		Lepuix Gy	13	5
	M		Cusset	16	5,5
	M		Sainte Magnance	15	10

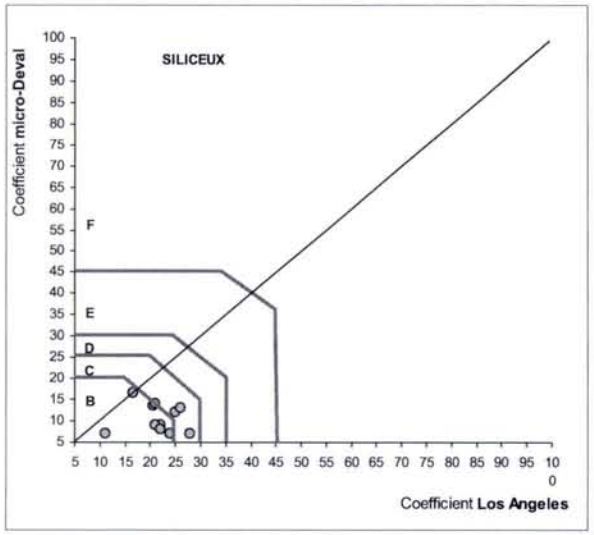
313) CLASSIFICATION DES DIFFERENTES NATURES DE GRANULATS SELON XP P 18-540

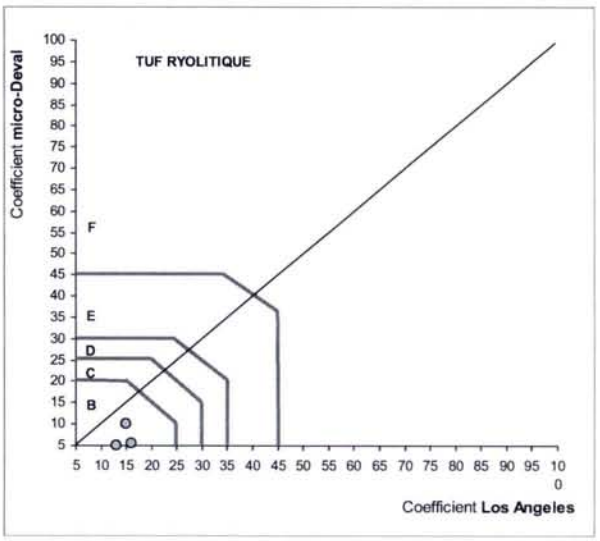
Le premier traitement proposé consiste à reporter, par nature de roche, les caractéristiques mécaniques intrinsèques des granulats dans le référentiel de la norme XP P 18 – 540, article 7 (***fig.31-1***). Les diagrammes comportent une droite d'égalité, afin de mieux situer les résultats.

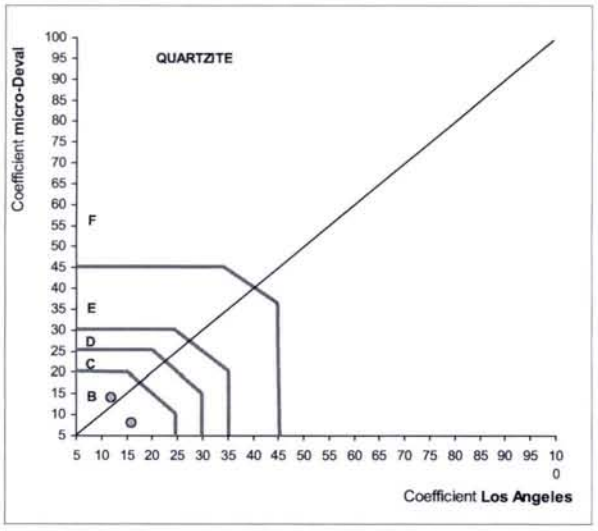
fig. 31-1 : classification des familles de granulats selon la XP P 18-540 § 7

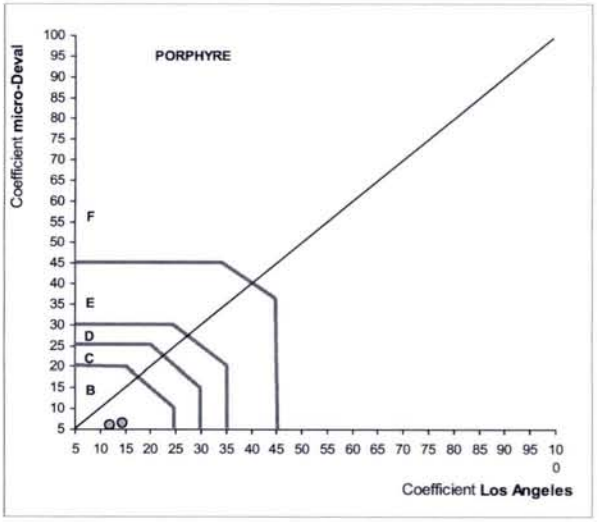


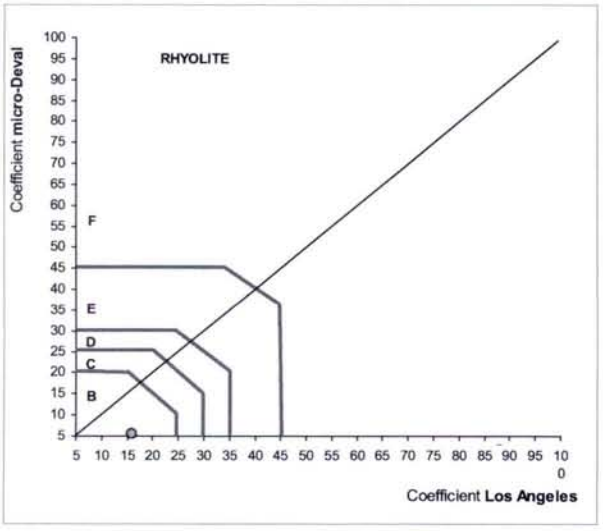



SILICEUX
Coefficient micro-Deval
Coefficient Los Angeles
F
E
D
C
B


TUF RYOLITIQUE
Coefficient micro-Deval
Coefficient Los Angeles
F
E
D
C
B


QUARTZITE
Coefficient micro-Deval
Coefficient Los Angeles
F
E
D
C
B


PORPHYRE
Coefficient micro-Deval
Coefficient Los Angeles
F
E
D
C
B


RHYOLITE
Coefficient micro-Deval
Coefficient Los Angeles
F
E
D
C
B

Ces graphiques montrent, comme précédemment (Boëdec, pour la Lorraine uniquement), que les calcaires présentent une certaine corrélation entre les valeurs de LA et de MDE, malgré une importante dispersion du fait de la non différenciation des faciès.

Toutefois, les calcaires tendres (E,F) résistent moins bien à l'attrition (!) alors que les calcaires plus durs (B, C, D) sont moins performants aux chocs. Mais, il peut s'agir ici d'un artéfact dû à l'essai Los Angeles lui-même (effet matelas associé à l'augmentation du spectre granulaire).

En revanche, les matériaux riches en silice résistent toujours bien à l'usure, mais présentent (souvent) un caractère fragile.

Les silico-calcaires ont un comportement qui se rapproche des matériaux siliceux.

314) SPECIFICITES DES CARACTERISTIQUES LA ET MDE DES CALCAIRES

Les calcaires présentent des caractéristiques intrinsèques très dispersées. Aussi, avons nous repris indépendamment les données concernant les carrières pour lesquelles les faciès sont identifiés. Ce traitement fait l'objet des tableaux (***tab.31-2***) et des graphiques (***fig. 31-2***) suivants.

tab. 31-2 : valeurs LA et MDE pour différents faciès calcaires exploités en région lorraine

Lieu	Faciès	LA	MDE
Viterne	Calcaire à entroques	22	26
A 33		32	41
Châtenois		27	37
Removille		30	39

Lieu	Faciès	LA	MDE
Echrange	Calcaire d'Ottange	37	70
		62	78

Lieu	Faciès	LA	MDE
Viterne	Oolithe blanche	22	26
A 33		33	36
A 33 - sondage		35	30

Lieu	Faciès	LA	MDE
Selaincourt	Oolithe miliaire inférieure	24	29
Harmonville		27	38

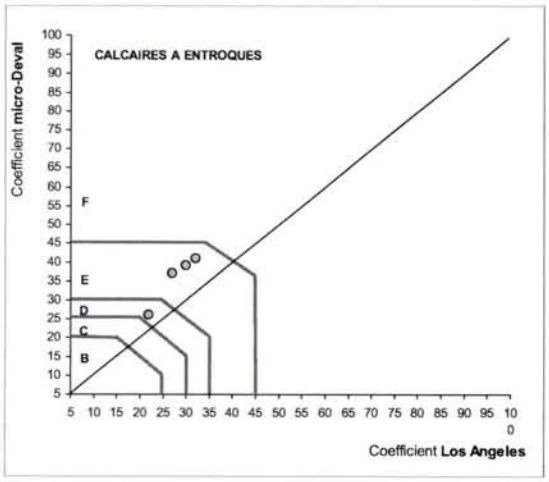
Lieu	Faciès	LA	MDE
Bicqueley	Oolithe miliaire supérieure	44	86
Tranqueville		29	36
Jaillon		55	57

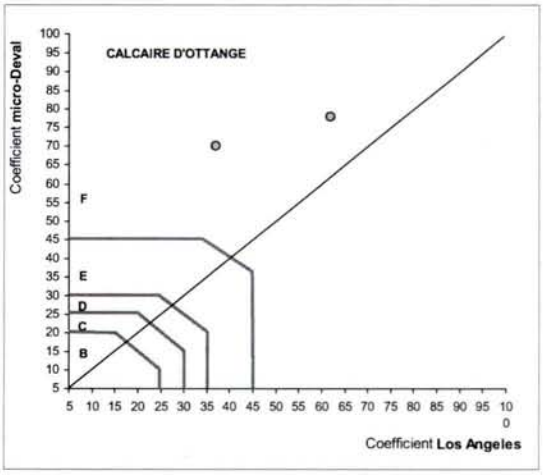
Lieu	Faciès	LA	MDE
Removille	Calcaire gréseux et à entroques	37	40
Rouvres		27	31
Courcelle / Châtenois		25	34

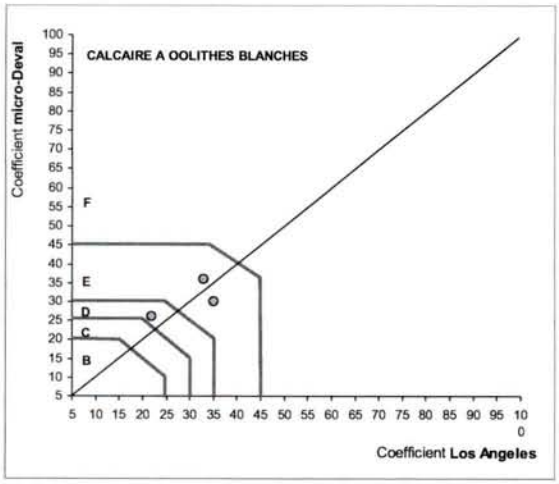
Lieu	Faciès	LA	MDE
Lorry - Mardigny	Polypiers inférieurs	35	53
		21	22
Viterne		28	35
Crepey		28	33
A 33		27	28
		27	30
		24	21
Rouvres		27	29
Châtenois		23	30

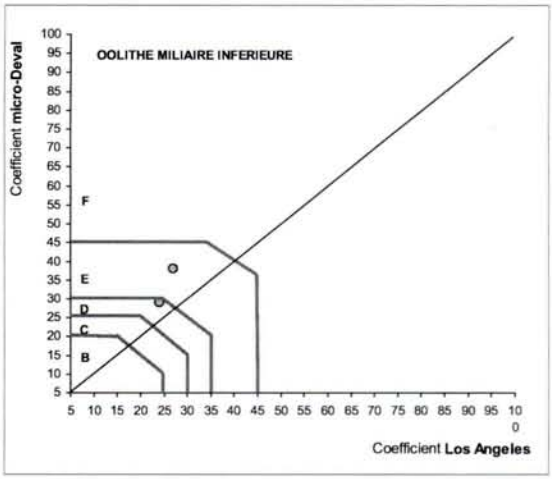
Lieu	Faciès	LA	MDE
CD 15	Polypiers supérieurs	37	66
Norroy		32	36
Favière		23	21
Viterne		36	34
Courcelles / Chatenois		25	26
Beaufremont		26	23
Harchéchamps		28	26
Pompierre		35	32

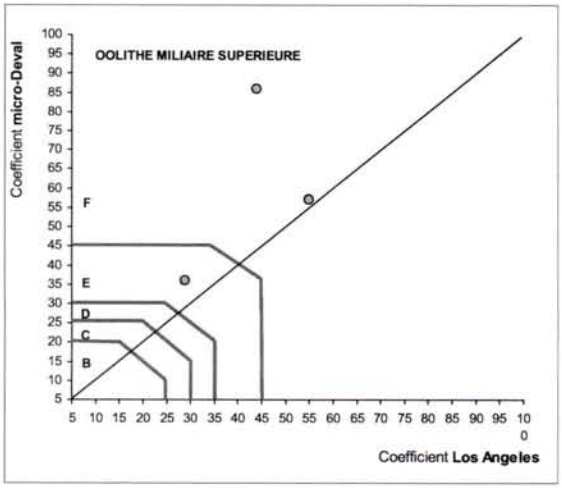
fig. 31-2 : performances des granulats calcaires lorrains selon différents faciès.

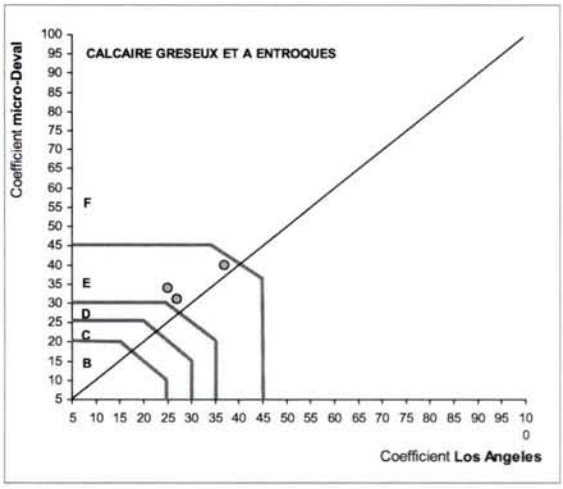


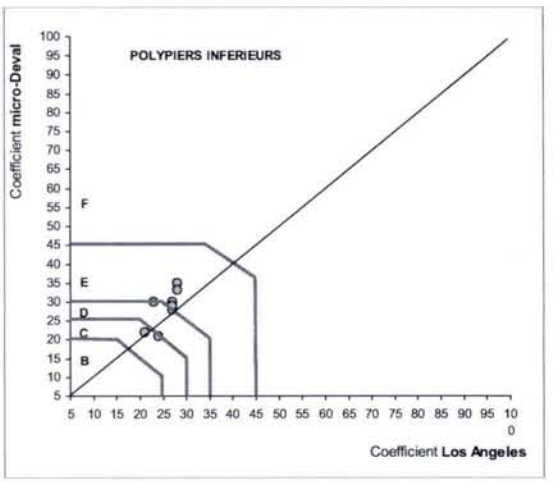


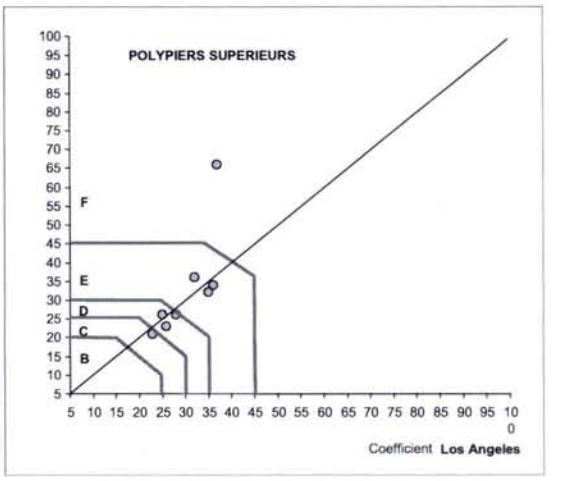












Quel que soit le faciès, on retrouve la même tendance, c'est-à-dire une variation concomitante des propriétés mécaniques avec toujours une « défaillance » de la résistance à l'usure pour les produits les plus tendres.

Par contre, on retrouve des différenciations intéressantes entre les faciès, à l'avantage de ceux ayant les textures Bounstone à Grainstone (polypiers, oolithes), au détriment des textures à grains non jointifs (Wakestone, ...) comme le calcaire d'Ottange et l'oolithe miliaire supérieure.
Les premiers peuvent atteindre la catégorie C alors que les seconds sont plus généralement classés E et F.

315) CARACTERISATION DES CALCAIRES EN TRACTION ET EN COMPRESSION

D'autres essais simples peuvent être pratiqués sur les roches, pour quantifier leur potentiel mécanique. Il s'agit ici d'appliquer la démarche proposée dans l'ouvrage de Arquié et Tourenq [***J-1***] et de mettre en parallèle les performances mécaniques (compression et module) générales moyennes des roches avec leurs performances intrinsèques (LA et MDE).

Le tableau ci-après (***tab.31-3***) reprend les valeurs moyennes des données proposées par ces auteurs, pour les roches calcaires.

tab.31-3 : caractéristiques moyennes nationales des roches calcaires, Arquié et Tourenq [***J-1***]

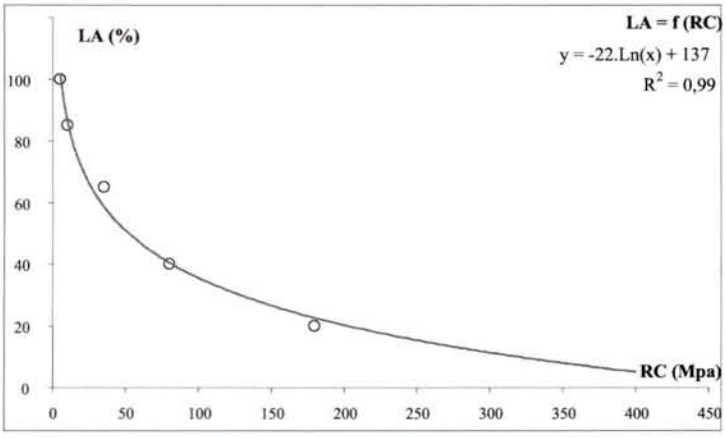
Résistance à la compression (MPa)	Module de déformation (Gpa)	Coefficient Los Angeles (%)	Coefficient micro-Deval en présence d'eau (%)
180	75	20	14
80	40	40	20
35	28	65	30
10	12	85	60
5	100 (*)	100	100

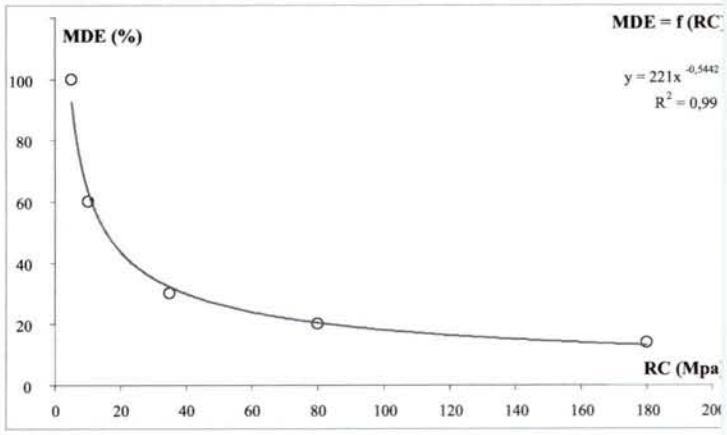
(*) valeur probablement erronée

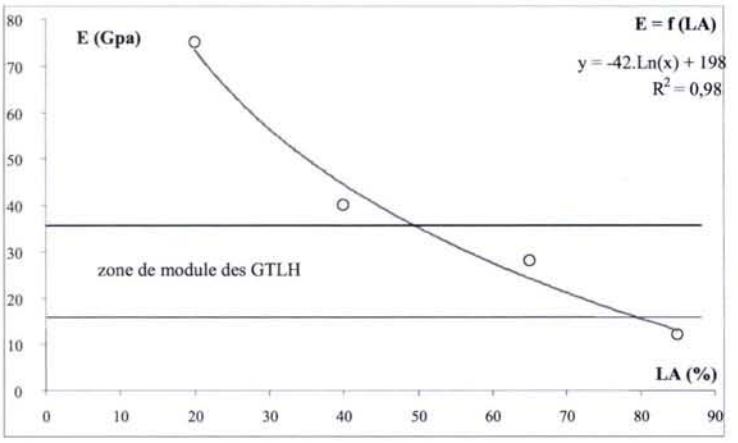
Nous avons recherché des expressions numériques simples figurant les relations entre ces différentes propriétés, sans chercher une justification « naturaliste » pour les coefficients trouvés. Les six combinaisons possibles sont figurées sur les graphiques suivants (***fig.31-3***), avec les relations proposées reportées sur les graphiques.

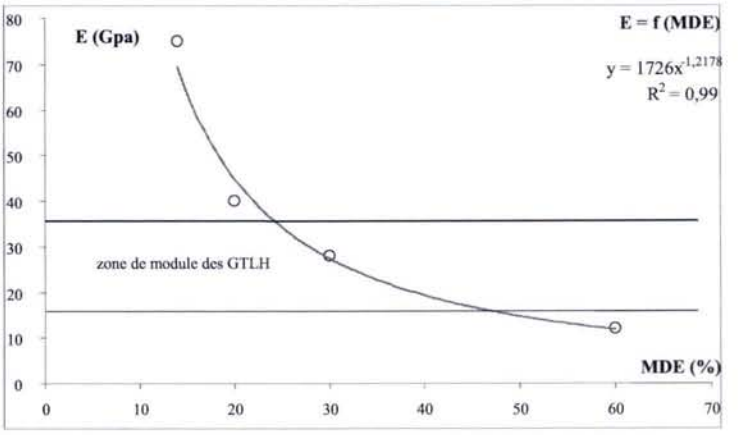
Les documents relatifs aux modules sont donnés à titre informatif. Nous y avons toutefois rapporté la plage des modules des GTLH, à titre de comparaison.

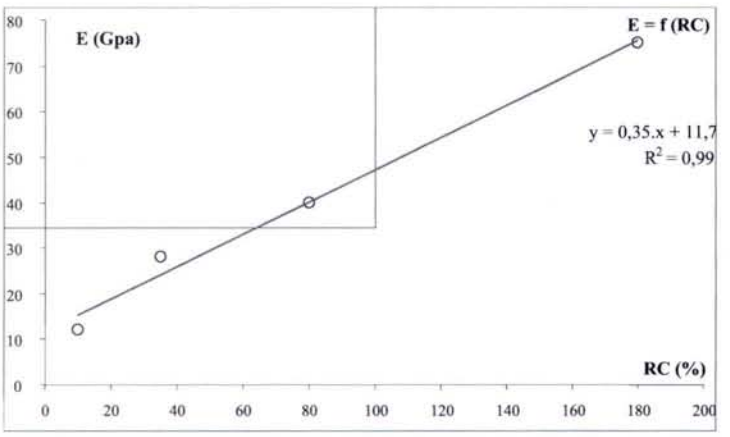
fig. 31-3 : relations entre les performances mécaniques des roches calcaires et les caractéristiques intrinsèques des granulats (selon Arquié et Tourenq, [***J-1***])





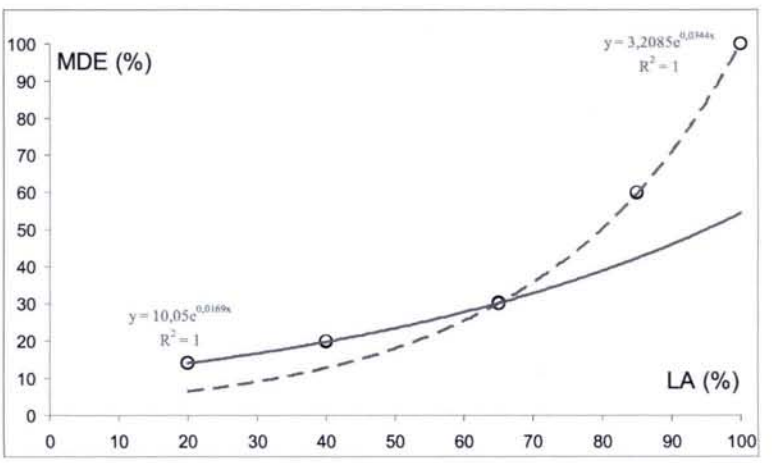






Pour la relation entre LA et MDE, un ajustement unique n'a pas été retenu compte tenu de la distribution des points. Deux lissage sont proposés (***fig.31-4***) ; l'un pour le domaine de définition LA ∈ [20 ;65] qui correspond à la courbe basse, l'autre pour le domaine LA ∈ [65 ;100] pour la courbe haute.

fig. 31-4 : relation entre les coefficients LA et MDE – Lissage des points par domaines de définition



Ces graphiques montrent qu'il existe manifestement des relations avérées entre les caractéristiques mécaniques des roches calcaires et les caractéristiques intrinsèques des gravillons.

Rappelons que ces relations ont été figurées ici par des ajustements de formes variées, qui minimisent les écarts, sans qu'une signification physique particulière n'ait été recherchée.

Confrontation avec certains résultats propres aux calcaires lorrains

On utilise ici des mesures de compression réalisées dans le contexte de cette étude, sur des matériaux provenant des sites d'Attignéville et de Viterne (calcaire à polypiers du bajocien situés au sud de Nancy) et de Montois la Montagne (calcaire du bajocien situé à l'ouest de Metz).

Des mesures de traction ont été également réalisées sur ces matériaux.

Les échantillons ont été obtenus par carottage sur blocs de roches ne présentant pas, *visuellement*, de discontinuités. Les corps d'épreuves sont des cylindres.

Pour la résistance à la traction, deux méthodes d'essais ont été utilisées : la traction *directe* (diamètre 2,7 cm, hauteur 6,5 cm moyen) et la traction par *fendage* (diamètre 5,4 cm, hauteur 10 cm moyen).

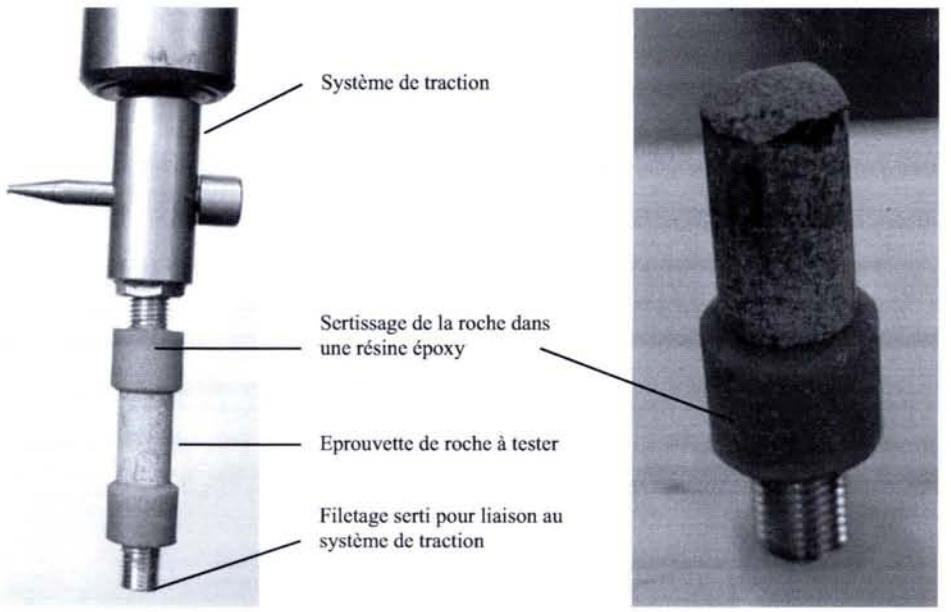
La résistance à la traction consiste à appliquer un effort de tension aux extrémités de l'éprouvette collées au système de traction. La force conduisant à la destruction de l'éprouvette (Fr) est divisée par la surface de rupture (S). La résistance à la rupture (Rt) s'exprime donc de la manière suivante :

$$Rt = \frac{Fr}{10 \times S}$$

Avec Rt en MPa, Fr en daN, et S en cm^2.

Cette manipulation est facilement maîtrisée pour des éprouvettes usinées, ainsi que pour les éprouvettes de MTLH. En revanche, elle est plus délicate pour les éprouvettes de roche. C'est pourquoi nous avons mis au point un dispositif spécifique figuré ci-après (***fig.31-5***).

fig. 31-5 : dispositif permettant la traction directe d'un élément de roche



Ce dispositif est assez laborieux à mettre en œuvre. Il n'a finalement pas été retenu dans le cadre de ces travaux.

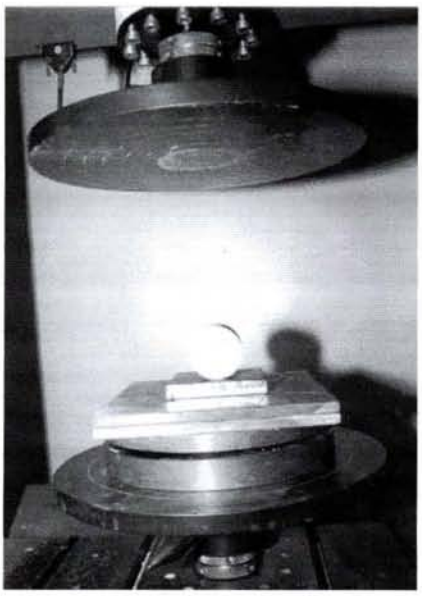
La résistance à la traction par fendage (Rtb) consiste à soumettre une éprouvette en compression diamétrale. La charge de compression (Fr) est appliquée, dans le cas d'un cylindre de rayon (R), le long de deux génératrices de hauteur (H) diamétralement opposées (***fig.31-6***). L'expression de la valeur de la résistance au fendage est :

$$Rtb = \frac{Fr}{10 \times R \times H \times \pi}$$

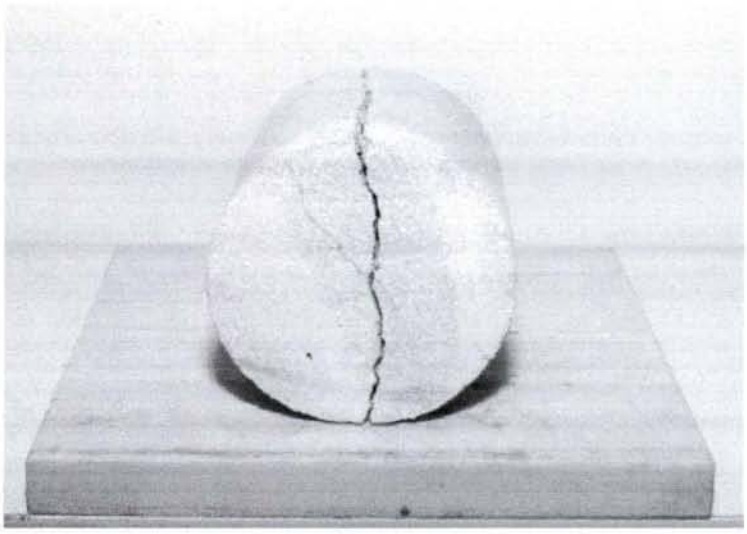
Avec Rtb en MPa, Fr en daN, R et H en cm.

fig. 31-6 : Exemple d'éprouvette de roche soumise à un test de résistance au fendage

Mise en place de l'éprouvette entre les plateaux de la presse



Eprouvette rompue par compression diamétrale : fendage



C'est cette méthode de mesure qui nous a servi à effectuer la détermination de la résistance au fendage des différentes roches que nous avons retenues.

Un coefficient de correspondance arbitraire de 0,80 a été appliqué aux résultats, pour transformer la traction par fendage en traction directe. Le coefficient est celui habituellement pris comme référence, entre autre pour les MTLH.

La résistance à la compression simple d'un cylindre de roche consiste à mettre en charge l'échantillon dans l'axe de sa génératrice longitudinale. L'appui s'effectue sur les faces parallèles de l'éprouvette pour éviter les phénomènes de flambement ou de chargement dévié (***fig.31-7***). De plus, pour éviter des *pointes de compression*, nous avons utilisé deux moyens d'interposition entre l'éprouvette et les plateaux de la presse. A la base de l'éprouvette, nous avons utilisé une boite à sable. Le sable employé est un sable fin de silice. Le diamètre de la boite à sable a été choisi de grande taille relativement au

diamètre de l'éprouvette pour éviter tout phénomène de frettage. En tête d'échantillon nous avons mis une simple plaque de contreplaqué d'épaisseur 5 mm.

L'expression de la valeur de la résistance à la compression (Rc) est :

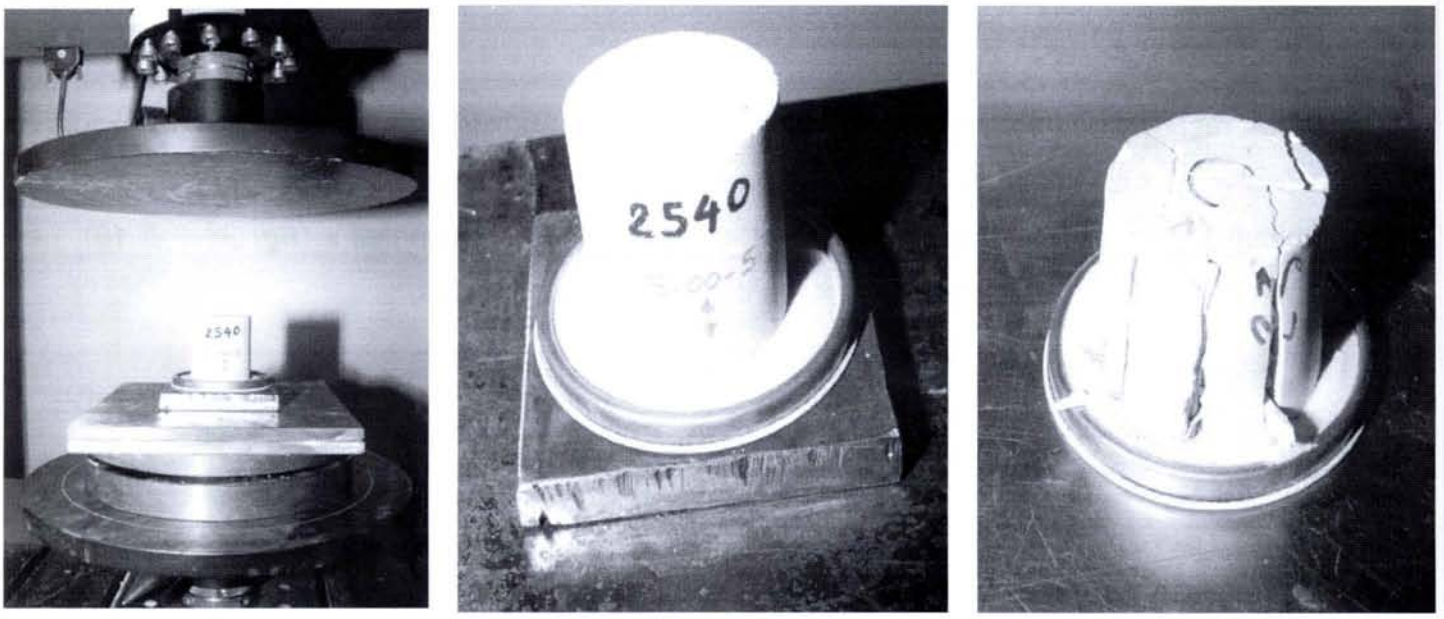
$$Rc = \frac{Fr}{10 \times S}$$

Avec Rc en MPa, Fr la charge de rupture en daN, S la section de l'éprouvette en cm^2.

fig. 31-7 : éprouvette de roche soumise à un test de résistance à la compression

On constate que le mode de rupture est comparable à celui d'autres matériaux plus traditionnels, comme les bétons.

Mise en place sous presse | Surfaçage inférieur au sable | Eprouvette rompue



Résultats

Les valeurs présentées (***tab.31-4***) concernent un large choix de calcaires lorrains, allant des plus tendres au plus durs. De plus, l'andésite de Raon l'Etape a été mentionnée à titre de référence. Les valeurs de LA et MDE obtenues sur les granulats issus de ces roches sont également portés dans le tableau 31-4, avec la classification dans le référentiel de la norme XP P 18-540.

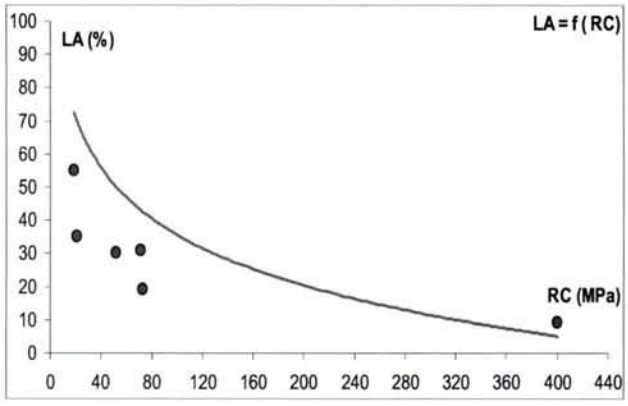
tab.31-4 : base de données (RC / Rtb / LA et MDE)

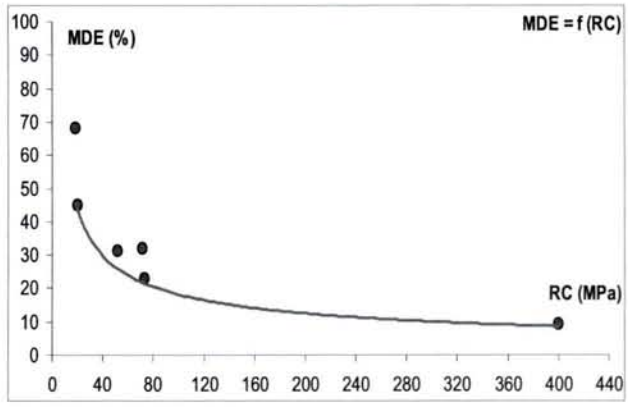
	Site *Nature de la roche*	**Rt = 0,80 Rtb moyenne en MPa**	**RC moyenne en MPa**	**MDE**	**LA**	**XP P 18-540**
Calcaire	**Montois la Montagne** *Oolithe de Jaumont (*)*	2,28	18,61	68	55	**F**
	Montois la Montagne *Calcaire à polypiers (*)*	2,82	20.71	45	35	**E / F**
	Viterne *Calcaires à entroques*	3,04	71.50	32	31	**E**
	Viterne *Calcaire oolithique*	3,84	51.80	31	30	**E**
	Attignéville *Polypiers supérieurs*	6,88	73.2	23	19	**C**
Référence	**Raon l'Etape** *Andésite*	-	400	9	9	**A**

(*) Appellation commerciale

Ces résultats ont été reportés dans les graphiques établis avec les données de Arquié et Tourenq, afin d'établir des comparaisons. Ces graphiques reprennent les lissages initialement obtenus, qui représentent les « moyennes nationales » (***fig. 31-8 à 10***). Les points figurés en noir représentent les calcaires lorrains testés.

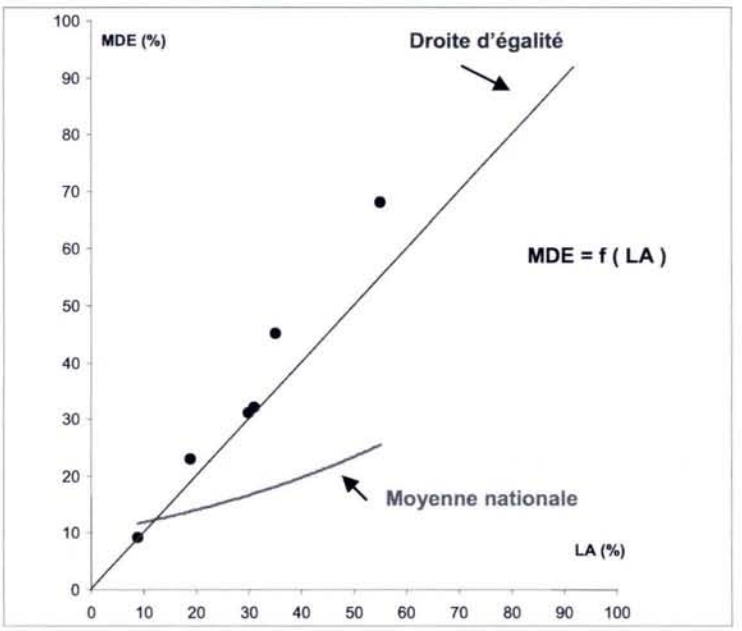
fig. 31-8 : relation entre la résistance à la compression et les coefficients LA et MDE
Cas des calcaires lorrains





Les courbes montrent la spécificité des calcaires lorrains, dans le sens où ces matériaux de faible résistance en compression, en général, présentent des résistances aux chocs intéressantes (faible LA). L'ensemble des calcaires français décrits par Arquié et Tourenq montre une tendance différente puisque les faibles valeurs de LA ne sont obtenues qu'avec des matériaux plus résistants à la compression.
A l'inverse, pour le MDE, « nos » calcaires sont un peu au-delà de la courbe moyenne des calcaires français, puisque les valeurs obtenues sont un peu plus fortes.
Enfin, le graphique LA, MDE montre une nette différence par rapport à l'ensemble des calcaires, au détriment du MDE qui est d'autant plus élevé que le LA est élevé (confirmation des tendances précédentes).

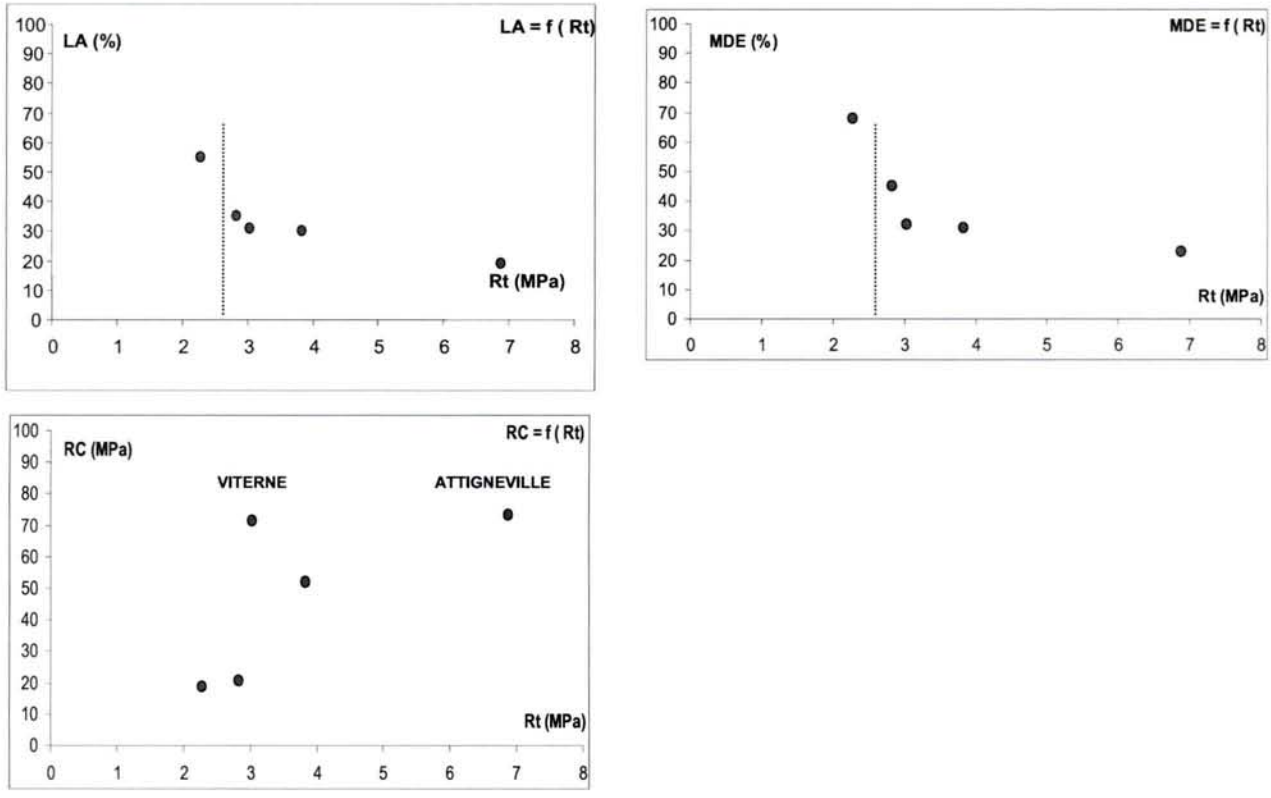
fig. 31-9 : relation entre coefficients LA et MDE



La notion de calcaire « tendre » attribué aux calcaires lorrains ne serait donc imputable qu'aux médiocres résistances à l'attrition, qui restent toutefois comparable à celles des autres calcaires français de même résistance à la compression.
On peut alors s'interroger sur le caractère discriminant du coefficient MDE dans la classification des gravillons pour assises routières, en présence d'un liant hydraulique notamment, où les grains sont solidaires (excepté peut être au droit des fissures de retrait).

Enfin, pour être exhaustif, nous complétons ce document par la présentation des relations entre la résistance à la tractions (Rt) et les paramètres LA, MDE et RC (***fig. 31-10***).

fig. 31-10 : relation entre la résistance à la traction, les coefficients LA et MDE et la résistance à la compression – Cas des calcaires lorrains



On remarque que les calcaires qui présentent une résistance à la traction (Rt) supérieure à 2,5 MPa ont des coefficients LA et des coefficients MDE plutôt faibles. Ces valeurs dépendent assez linéairement de la valeur de Rt, dans le sens où plus la Rt augmente, meilleure est la résistance aux chocs et à l'attrition des granulats.

En deçà de 2,5 MPa, ces coefficients deviennent particulièrement médiocres.

Enfin, il n'existe pas de relation avérée entre la résistance à la compression (Rc) à la traction (Rt). Deux calcaires de même Rc peuvent avoir des Rt qui évoluent du simple au double.

3 – 2 ADHERENCE LIANT HYDRAULIQUE ROUTIER – GRANULATS - Observation des zones de contact

321) INTRODUCTION

Une bonne adhérence entre la phase liante et les granulats est un gage de réussite d'un MTLH. Pour imager notre propos, on peut assimiler un MTLH à un empilement de grains fortement serrés dont la cohésion est donnée par phase liante durcie (***fig. 32-1***).

fig. 32-1 : aspect de la structure d'un MTLH calcaire (plan de fracture d'une éprouvette). On aperçoit les grains, la phase liante et les vides occlus.

La résistance à la traction et le module, propriétés habituellement recherchées pour le produit, vont donc dépendre des propriétés de la phase liante, de celles du granulat et, dans une certaine mesure, de l'adhérence entre les deux constituants du composite. En effet, à propriétés mécaniques égales, l'adhérence assure une meilleure répartition des sollicitations, entre la phase liante et le granulat. Le champ de contrainte est plus isotrope, ce qui induit un comportement mécanique plus homogène. Grâce à l'adhérence entre les deux constituants, et dans les conditions d'une formule optimale, le composite peut alors atteindre une résistance supérieure à la résistance maximale du granulat ou de la phase liante seules [***K-1***]. Cela est d'autant plus vrai pour les *matériaux en limites de spécifications* de notre étude, dont les propriétés mécaniques se rapprochent de celle de la phase liante.

On peut, à ce stade, réaliser quelques calculs élémentaires à partir d'une formule courante de MTLH, pour caractériser la structure du produit. Prenons l'exemple du mélange

représenté sur la figure précédente. Il s'agit d'un MTLH à base des calcaires à polypiers 0/6 et 6/20 de Montois-la-Montagne et de liant routier LSC+. Les propriétés des constituants et les proportions du mélange sont données dans le tableau ci-dessous (***tab.32-1***).

tab. 32-1 : exemple de formule d'un MTLH. Matériaux calcaires de Montois-la-Montagne

Matériau	MVR	Ab	% dans le mélange	Masse	Volume
0/6	2,56	2,2	34,5	345	135
6/20	2,57	2,0	62	620	241
LSC+	2,9	0	3,5	35	12
			100	1000	388
Eau	1	/	7,5	75	55(*)
				1075	443

(*) En tenant compte de l'absorption

Les masses volumiques apparentes sèches issues de l'essai Proctor modifié (***tab.32-2***) permettent de calculer le volume des vides du mélange humide ou du mélange sec. On notera que ces volumes sont relativement conséquents. Pour le produit durci, on peut estimer qu'il est de l'ordre 12 %, compte tenu de l'eau mobilisée pour l'hydratation du liant. Ces vides apparaissent essentiellement sous forme de cavernes localisées (voir photo ***fig.32-1***). Le reste du composite est plutôt homogène, avec un bon « enrobage » des grains.

tab. 32-2 : exemple de formule d'un MTLH. Matériaux calcaires de Montois-la-Montagne

Humide		Sec
2,426	MVR théorique	2,577
2,220	MVR Proctor modifié	2,140
8,5	vides intergranulaires (%)	17

Sur la base des relations utilisées dans le domaine des bétons, ces calculs sommaires permettent aussi d'estimer un ordre de grandeur de la résistance à la compression (Féret) et à la traction (de Larrard) de la phase liante (rapport e/c, volume des vides, etc.). On obtient respectivement (de l'ordre) de 5 et de 0,9 MPa pour ces deux propriétés.

Sachant par ailleurs que les classes obtenues avec ce mélange sont typiquement G3-G4, classes pour lesquelles la résistance à la traction du composite est comprise entre 1 et 2 MPa, on peut alors prétendre que le surcroît de performance est dû à l'adhérence entre la pâte liante et les grains (la résistance à la traction des grains étant de l'ordre de 2,5 MPa pour ce produit, (voir publication 2 – partie 4).

Notons enfin qu'à adhérence égale, pour un même granulat, la résistance à la traction dépend de celle de la phase liante. Cette résistance peut être améliorée, sans surcroît de ciment, si l'on réduit le volume des vides, en augmentant la compacité du squelette granulaire (proportions du mélange, forme des grains, etc.).

La texture des grains intervient aussi, dans la mesure où des surfaces rugueuses donnent une meilleure adhérence (ou verrouillage) mécanique.

Enfin, des réactions chimiques peuvent intervenir entre le liant et le grain, donnant naissance à des phases minérales qui augmentent la résistance mécanique. Il s'agit de carboaluminates, dans le cas des calcaires. Ces phases modifient la structure de l'auréole de transition [***K-2***], en périphérie des grains poreux. Elle ne constitue plus alors une zone de faiblesse, comme dans le cas de certains bétons. La rugosité des grains peut aussi évoluer dans le cas des roches calcaires, par passage en solution d'ions Ca^{++} et CO_3^{--}.

L'adhérence entre pâte liante et grains, sous ses diverses formes, apparaît donc comme l'un des paramètres influant de la résistance à la traction des MTLH. Le but n'est pas ici de proposer des modèles capables de prévoir la part respective de chacun de ces éléments dans la résistance globale. Il s'agit plus simplement de rapporter une série d'expériences réalisées avec différents gravillons, pour montrer l'importance de l'adhérence, dans le cas des mélanges calcaires notamment.

322) OBSERVATION DE L'ADHERENCE

Nous avons effectué des moulages de gravillons de différentes natures pétrographiques dans un mortier formé d'un mélange de liant hydraulique (CEM II/B–M (L-S-V) 32,5R) et de fines de silice. Les éprouvettes réalisées ont été rompues par fendage et les plans de fractures ont été observés.

Les gravillons sélectionnés pour cette étude sont de natures pétrographiques différentes. Leurs caractéristiques et propriétés sont présentées dans le tableau suivant (***tab.32-3***). La coupure granulaire retenue est 6,3/10. Aucun « déplatage » n'a été effectué, de façon à ce

que la forme des grains soit représentative du procès de fabrication. De plus, les granulats ont été lavés sur la toile de 6,3 mm pour éviter les problèmes de pollution.

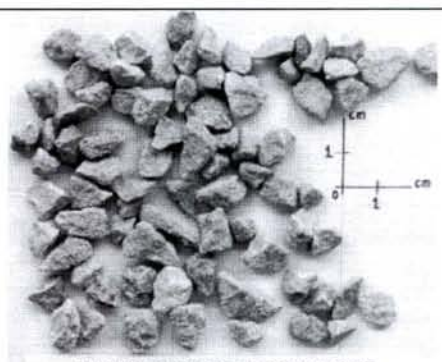
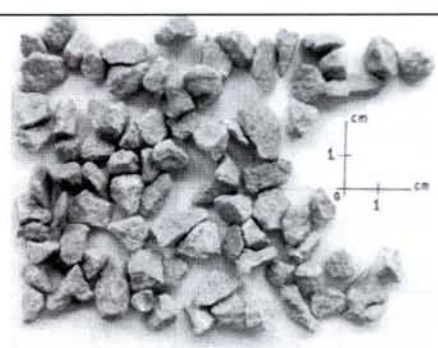
tab. 32-3 : caractéristiques des gravillons échantillonnés

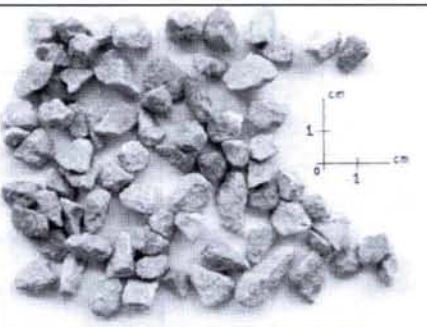
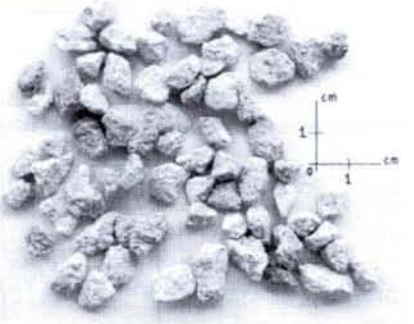
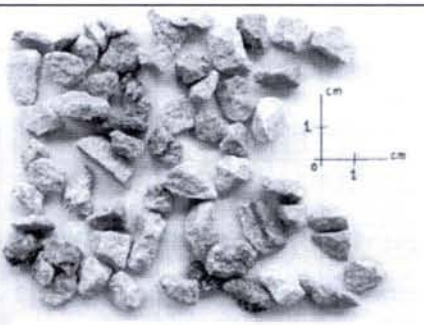
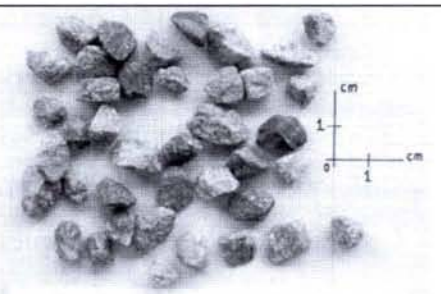
Provenance	Pétrographie	Coefficient LA	Coefficient MDE
Montois la Montagne	Oolithe (*)	55	69
	Polypiers (*)	37	47
	Polypiers gris	-	-
	Polypiers jaunes	-	-
Jaillon	Oolithe miliaire supérieure	48	67
Viterne	Polypiers inférieurs et supérieurs	35	33
Hersbach	Grauwacke	12	9
Raon l'Etape	Andésite	9	9
Bille de verre	Silice	-	-

(*) Appellation commerciale

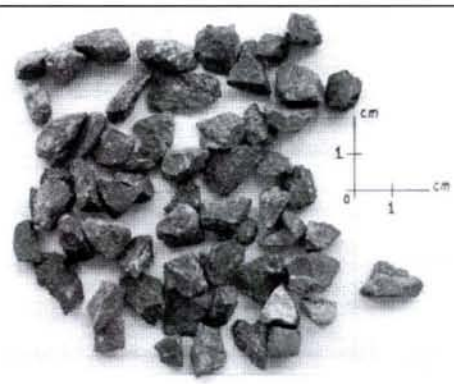
Le tableau (***tab.32-4***) suivant permet de visualiser la morphologie des grains utilisés.

tab. 32-4: caractéristiques morphologiques des granulats testés

Provenance	Pétrographie	Morphologie
Montois la Montagne	Polypiers	 6.3 / 10 MONTOIS LA MONTAGNE POLYPIERS
	Polypiers gris	 6.3 / 10 MONTOIS LA MONTAGNE POLYPIERS GRIS

	Polypiers jaunes	 6.3 / 10 MONTOIS LA MONTAGNE POLYPIERS JAUNES
Jaillon	Oolithe miliaire supérieure	 6.3 / 10 JAILLON
Viterne	Polypiers inférieurs et supérieurs	 6.3 / 10 VITERNE
Hersbach	Grauwacke	 6.3 / 10 HERSBACH

S.C.D. - U.H.P. NANCY 1
BIBLIOTHÈQUE DES SCIENCES
Rue du Jardin Botanique - BP 11
54601 VILLERS-LES-NANCY Cédex

Raon l'Etape	Andésite	 6.3 / 10 TRAPP

Le liant hydraulique retenu n'est pas un liant routier, mais un ciment CEM II/B – M (L-S-V) 32,5R. Une charge siliceuse a été ajoutée au ciment, pour limiter son dosage. Il s'agit du sable 0/200 µm utilisé pour l'indice de rupture des émulsions. L'eau employée pour le gâchage des éprouvettes est celle du réseau public.

La pâte liante a été formée par un mélange de 80 % de ciment et de 20 % de fines de silice. La quantité d'eau a été ajustée pour avoir une fluidité (arbitraire) compatible avec le coulage. Le rapport E/C de cette pâte est de 0,46. Il a été maintenu constant pour toutes les éprouvettes.

Les granulats ont préalablement été imbibés d'eau, selon la méthode de la norme NF P 18-554, pour éviter tous risques dus à l'absorption. Les granulats ont ensuite été essuyés (surface sèche).

Ces granulats sont enrobés dans le mortier fluide puis disposés (empilés) dans des moules cylindriques d'environ 5 cm de diamètre et 6 cm de hauteur. Du coulis de mortier est alors versé sur ces grains pré-laqués, pour remplir tous les interstices. Le moule a été soumis à une dépression de 350 mm de Hg pendant une minute pour limiter autant que possible les bulles d'air. Les éprouvettes sont alors étanchées puis conservées à température constante (20°C +/- 2 °C)

Elles ont été rompues par fendage après 28 jours de cure. Les résultats des essais sont reportés dans le tableau suivant (***tab.32-5***). Les valeurs ne sont données qu'à titre informatif, car statistiquement peu fiables. Par ailleurs, nous avons attribué une échelle sonore pour caractériser le mode de rupture des éprouvettes testées, sans toutefois trouver de relation avec la résistance du matériau ou les caractéristiques des grains.

tab. 32-5 : résultats des essais mécaniques (fendage diamétral)

Provenance	Pétrographie	H (cm)	D (cm)	F (daN)	Rtb (MPa)	Rupture
Montois la Montagne	Oolithe	6.085	5.215	1082	2.17	Très souple
	Polypiers	5.815	5.215	1722	3.62	Brutale
	Polypiers gris	5.800	5.215	1434	3.02	Souple
	Polypiers jaunes	6.090	5.215	1581	3.17	Brutale
Jaillon	Oolithe miliaire supérieure	6.141	5.215	1187	2.36	Souple
Viterne	Polypiers inférieurs et supérieurs	5.806	5.215	1436	3.02	Brutale
Hersbach	Grauwacke	5.990	5.215	1832	3.73	Brutale
Raon l'Etape	Andésite	5.655	5.215	1400	3.02	Souple
Bille de verre	Silice	5.745	5.215	1122	2.38	Très brutale
Pâte de mortier pure	-	5.745	5.215	1760	3.74	Brutale

Trois niveaux d'adhérence ont été déduits de l'observation des plans de fracture : non adhérent, faiblement adhérent et fortement adhérent. Le résultat de ces observations est reporté dans les planches photographiques suivantes (***fig. 32-2 à 32- 5***)

fig. 32-2 : plans de fracture du mortier (témoin)

témoin

- mortier de ciment

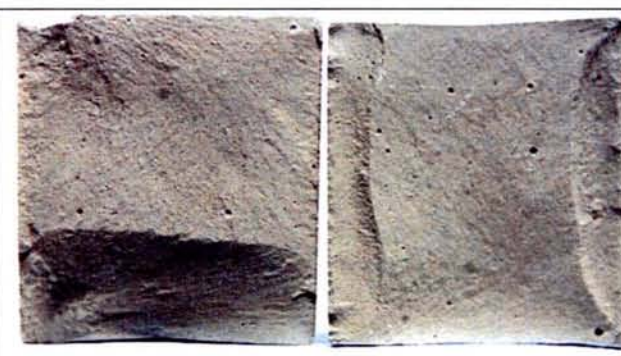


fig. 32-3 : plans de fracture du mélange non adhérent

non adhérent ➢ billes de verre	

fig. 32-4 : plans de fracture de mélanges à faible adhérence

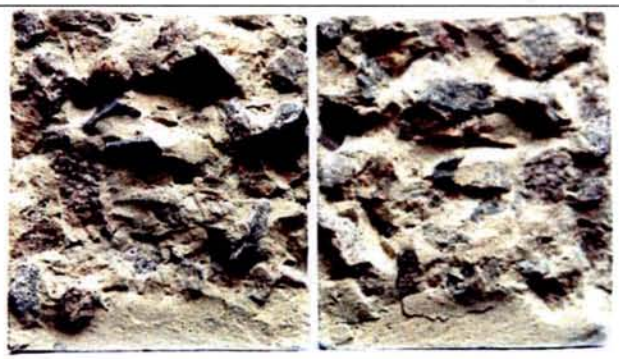
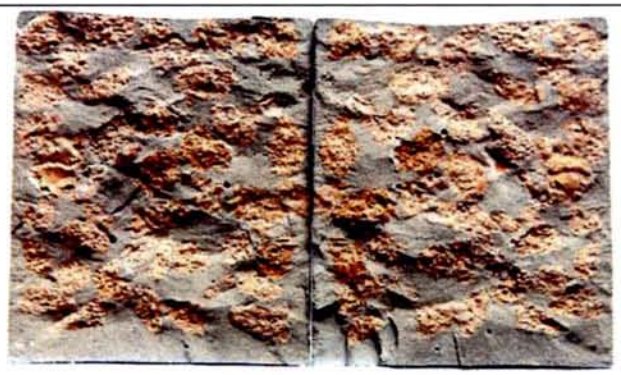
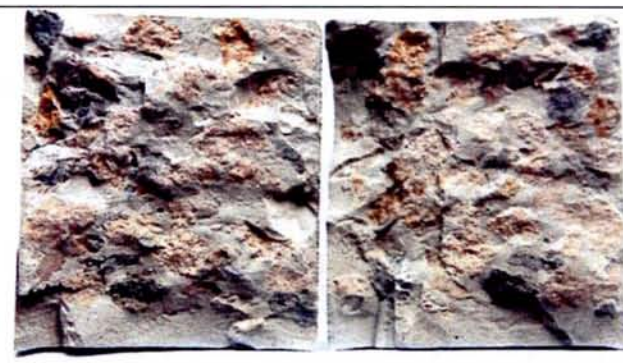
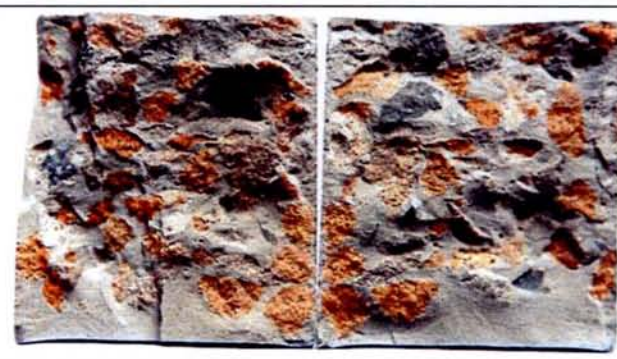
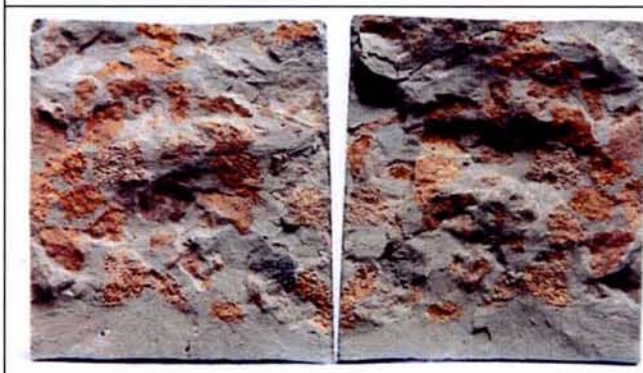
faiblement adhérent ➢ Raon l'Etape	
➢ Hersbach	

fig. 32-5 : plans de fracture de mélanges de forte adhérence

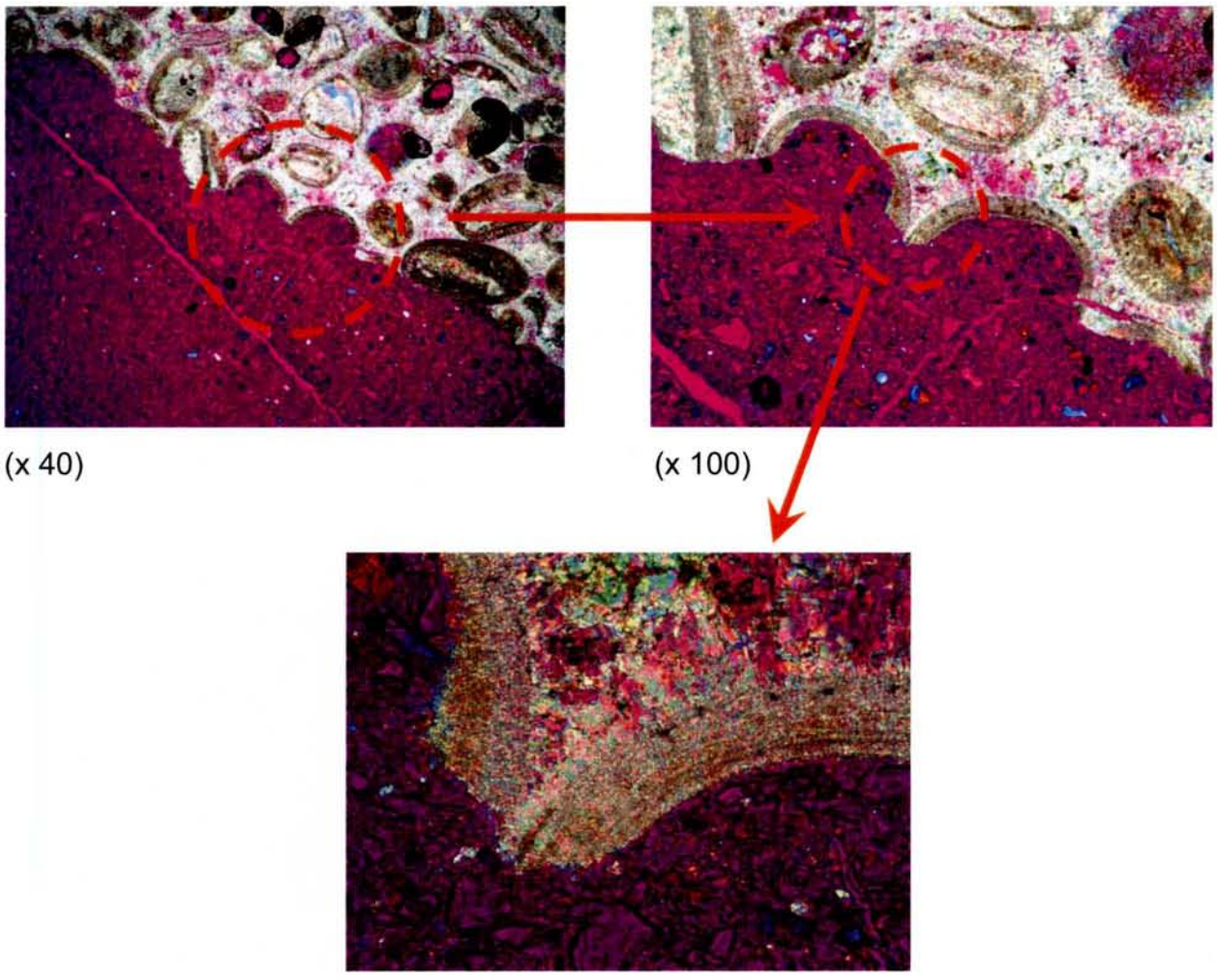
forte adhérence ➢ Jaillon	

➢ Viterne	
➢ Montois la Montagne	
➢ Montois la Montagne (gris)	
➢ Montois la Montagne (jaunes)	

Enfin, des lames minces ont été réalisées sur les mélanges à base des granulats de Montois la Montagne, pour visualiser de manière plus précise la qualité de l'enrobage des grains (***fig.32-6***).

fig. 32-6 : observation du contact granulat / mortier sur lames minces

Matériaux de la carrière de Montois la Montagne (Calcaire) – CEM II/B



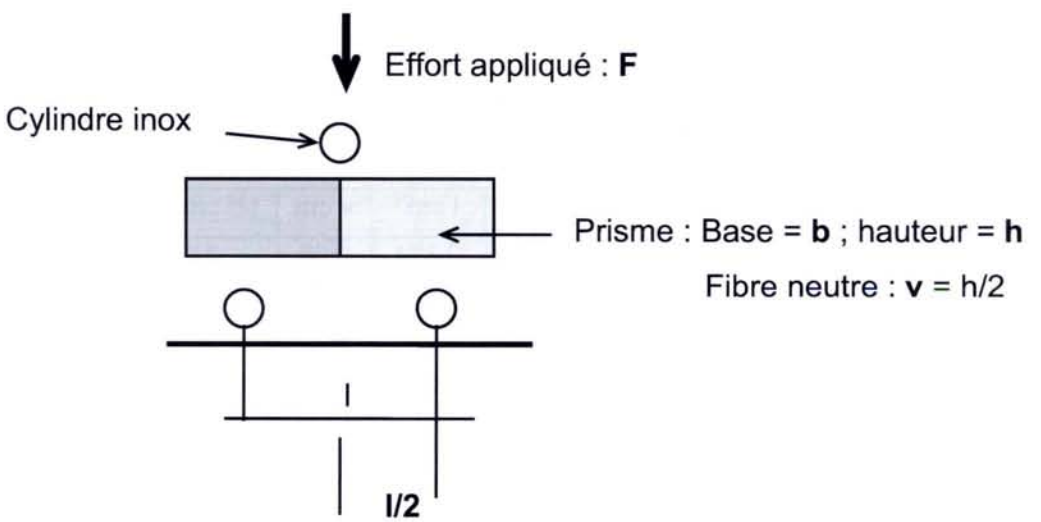
Les lames minces, observées en LPPA plus lame d'onde pour le calcaire (couleur mauve), montrent clairement la capacité qu'a le mortier de liant hydraulique à enrober les grains jusqu'au niveau de la fine texture des granulats. Egalement, on peut voir que les granulats calcaires ont une rugosité qui s'étale sur bien des échelles. Lorsque l'on observe le cliché du calcaire avec un grossissement de 400 x, on distingue nettement la rugosité générée par la rupture du cortex d'une oolite après le départ du nucléus.

323) RESISTANCE DE L'INTERFACE LIANT / GRANULAT

Ces travaux concernent des bétons à base de granulats calcaires [***K-3***]. L'idée était de voir l'influence de la teneur en laitier sur la résistance à la traction. Nous avons mis au point une méthodologie pour essayer de qualifier la qualité de cette affinité entre la roche calcaire et le liant hydraulique utilisé. Le domaine des bétons n'est pas très éloigné de notre contexte d'étude sur les GTLH. Seules les méthodes usuelles de formulation, les teneurs en liant ainsi que bien souvent la nature des liants peuvent changer. Mais, dans les deux cas, il s'agit de mélanger des granulats à un liant hydraulique et de le compacter de manière à obtenir une produit aussi dense que possible pour bénéficier pleinement de son potentiel mécanique.

Des prismes (parallélépipèdes rectangles) ont été réalisés. Ces prismes sont constitués de deux parties : la moitié est une pâte pure de liant hydraulique (ciment) et la seconde moitié est la roche testée. Le point de contact de ces deux phases est l'interface que nous nous sommes proposés d'observer lorsque l'on fait subir à cette éprouvette un test de flexion simple (***fig.32-7***).

fig. 32-7: schéma de mise en charge des prismes biphasiques (roche / pâte pure de ciment)



La valeur de traction est déduite de la loi de Hooke :

$$Rt = \frac{Mf}{I/v}$$

avec

- Mf (moment fléchissant) $Mf = \left| \pm \frac{F}{2} \times \frac{L}{2} \right|$
- I (moment quadratique) $I = \frac{b \times h^3}{12}$

Deux natures de ciment ont été testées : un CEM II et un CEM III. La roche provient de la carrière de Viterne où nous avons prélevé différents faciès présents sur le front de taille. Tous les résultats de ces manipulations sont reportés dans les deux tableaux ci-dessous (***tab. 32-6 et 32-7***).

tab. 32-6 : résultats des mesures avec le CEM III

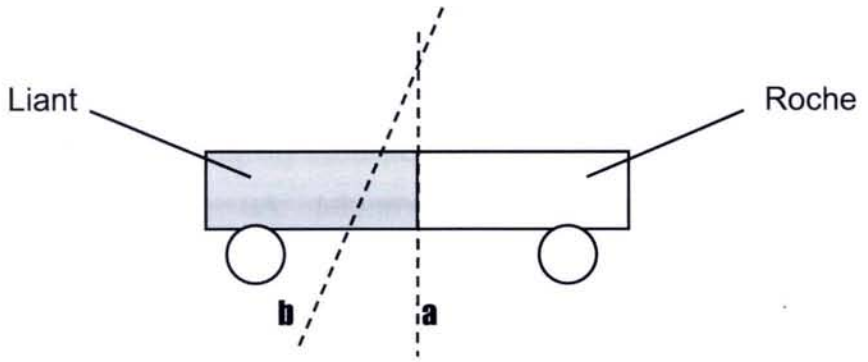
N °	l mm	b mm	h mm	f daN	I cm^4	v cm	Mf cm.daN	Rt MPa	Rupture (*)
1	24,90	18,55	18,52	109,6	0,982	0,93	68,2	6,43	b
2	26,78	17,76	13,12	47,8	0,334	0,66	32,0	6,27	b
3	26,65	18,33	18,50	76,0	0,967	0,93	50,6	4,84	b
4	26,65	13,80	18,42	54,8	0,719	0,92	36,5	4,68	b
5	26,65	19,67	17,23	80,2	0,838	0,86	53,4	5,49	b
6	26,65	19,50	19,00	89,0	1,115	0,95	59,3	5,05	b
							moyenne	**5,46**	

tab. 32-7 : résultats des mesures avec le CEM II

N °	l mm	b mm	h mm	f daN	I cm^4	v cm	Mf cm.daN	Rt MPa	Rupture (*)
1	26,60	18,54	13,55	21,2	0,384	0,68	14,1	2,48	a
2	26,60	18,70	17,38	42,8	0,818	0,87	28,5	3,02	a
3	26,60	18,50	16,96	62,5	0,752	0,85	41,6	4,69	a
4	26,80	16,26	19,66	63,0	1,030	0,98	42,2	4,03	a
							moyenne	**3.56**	

(*) Positions des plans de ruptures (***fig.32-8***).

fig. 32-7: positions des plans de fractures observés lors des essais de flexion



Avec le CEM III, la rupture ne se produit pas à l'interface, mais légèrement décalée vers le liant. La valeur moyenne de Rt est 5,5 Mpa. Pour le CEM II, la rupture se produit à l'interface avec, pour valeur moyenne de Rt, 3,6 Mpa. Nous en concluons donc que le « collage » au CEM III est supérieur à la résistance de la roche (qui rompt en premier) alors que pour le CEM II, l'interface est le point de fragilité. Les résistances de collage réelles sont donc meilleures avec un liant à base de laitier.

Les travaux de Lecomte [***K-4***], portant sur l'influence de la nature du ciment sur les propriétés des mortiers calcaires, ont montré que le CEM III était le liant le plus performant avec les granulats calcaires. Une hypothèse était cependant émise quant à son efficacité à l'interface : *«En présence des grains calcaires, il semblerait qu'il se forme des échanges et des combinaisons qui rattrapent, au niveau de la pâte, (et du contact ?), le manque de résistance des grains».*

Nos essais comparatifs ont donc permis de visualiser l'intérêt d'utiliser des ciments à base de laitier et de donner une valeur qualitative aux résistances de contact. Les travaux réalisés sur les bétons sont très certainement extrapolables aux produits routiers puisque nous connaissons bien maintenant la grande affinité des liants routiers fortement dosés en laitier avec les granulats calcaires.

324) CONCLUSION

Par ces quelques manipulations simples, nous avons voulu montrer que les granulats calcaires de la région lorraine présentent de bonnes dispositions vis-à-vis de l'adhérence, qui est un élément important de la performance en traction attendue pour un MTLH. Comparés à d'autres natures de granulats, les calcaires ne présentent pas d'anomalies particulières vis-à-vis de l'accroche liant / granulat. Au contraire, ils présentent généralement une bonne adhérence à la pâte, ce qui constitue un atout pour leur emploi en techniques routières. Il faut toutefois une propreté des grains satisfaisante pour ne pas perdre le bénéfice de l'adhérence. En effet, on peut penser que l'adhérence est d'autant meilleure que le granulat est propre, car les relations physique et chimiques avec la pâte en dépendent pour une large partie.

3 – 3 INFLUENCE DES FINES D'ATTRITION

331) INTRODUCTION

La présence de fines d'attrition dans les graves traitées et, peut-être, dans une moindre mesure, dans les sables traités, soulève deux points importants.

Le premier concerne les ouvrages en service, où le frottement vertical des parois des « dalles », au droit des fissures « naturelles » des GTLH, conduit fréquemment à une certaine attrition, en particulier si le matériau a un MDE faible. Les fines générées peuvent alors remonter en surface, voire venir s'intercaler entre les différentes couches de la structure, induisant des ruptures de collage. Cette « usure » des épontes aurait aussi pour effet de réduire la « rugosité » des parois. La couche ne pourrait plus bénéficier alors de l'effet d'engrènement typique des formulations à base de granulats concassés (plus résistants), effet favorable report d'effort tranchant. Ces cas *auraient* été relevés sur des ouvrages en service, à plusieurs reprises, par plusieurs professionnels du domaine routier.

Nous avons initialement envisagé d'aborder ce problème à partir de l'étude détaillée de carottes prélevées au droit des fissures d'ouvrage en service. Mais la réalisation pratique des sondages n'a malheureusement pas pu être effectuée dans le cadre de ce travail.

Le second point concerne le rôle des fines d'attrition des granulats calcaires sur la cinétique de prise, au moment de la mise en oeuvre. Nous avons examiné ce problème en étudiant les performances mécaniques en traction de pâtes à base d'un liant hydraulique routier spécialement formulé pour les matériaux calcaires, additionnées ou non de fines calcaires ou siliceuses.

Signalons que dans la partie suivante (3-4), nous nous sommes intéressés à l'évolution de la granularité de matériaux calcaires de diverses caractéristiques intrinsèques en fonction de divers paramètres de mise en œuvre, pour quantifier notamment la variation de la fraction fine.

332) FINES D'ATTRITION ET CINETIQUE DE DURCISSEMENT

La manipulation repose sur la mesure de la résistance à la traction de mélanges à base d'un liant routier pur ou additionné de fines calcaires ou siliceuses ajoutées au même taux. Ces mélanges ont été hydratés et moulés, puis les produits durcis ont été sollicités en compression diamétrale. Un suivi dans le temps des performances a été fait.

3321) Produits utilisés

Les constituants que nous avons utilisés sont les suivants :

Le liant hydraulique employé est un liant spécial routier : LSC+[1]. Ce produit a été spécialement mis au point pour les techniques de MTLH à base de granulats à caractère basique. Il s'agit d'un liant contenant 80 % de laitier activé au sulfate de calcium. Il est de classe HRB 30, selon la norme NF P 15-108. Ce liant est celui que nous utilisons habituellement pour les mélanges hydrauliques réalisés avec les matériaux de la carrière d'où proviennent les fines testées.

Les *fines* témoins choisies pour cet essai sont les fines de silice utilisée pour la détermination de l'indice de rupture des émulsions de bitumes. Elles sont naturelles, non broyées et de couleur blanche. Le taux de SiO_2 est supérieur à 98 % et le pH est neutre.

Les fines d'attrition utilisées sont issues du passage au MDE de la fraction 6/10 concassée et lavée des matériaux de la carrière de Montois-la-Montagne. Ces fines ont été séchées puis désagrégées à l'aide d'un pilon/mortier. Elles ont alors été maintenues en milieu humide pour ne pas être introduites sèches dans les gâchées de mortier. Leur teneur en eau a été prise en compte.

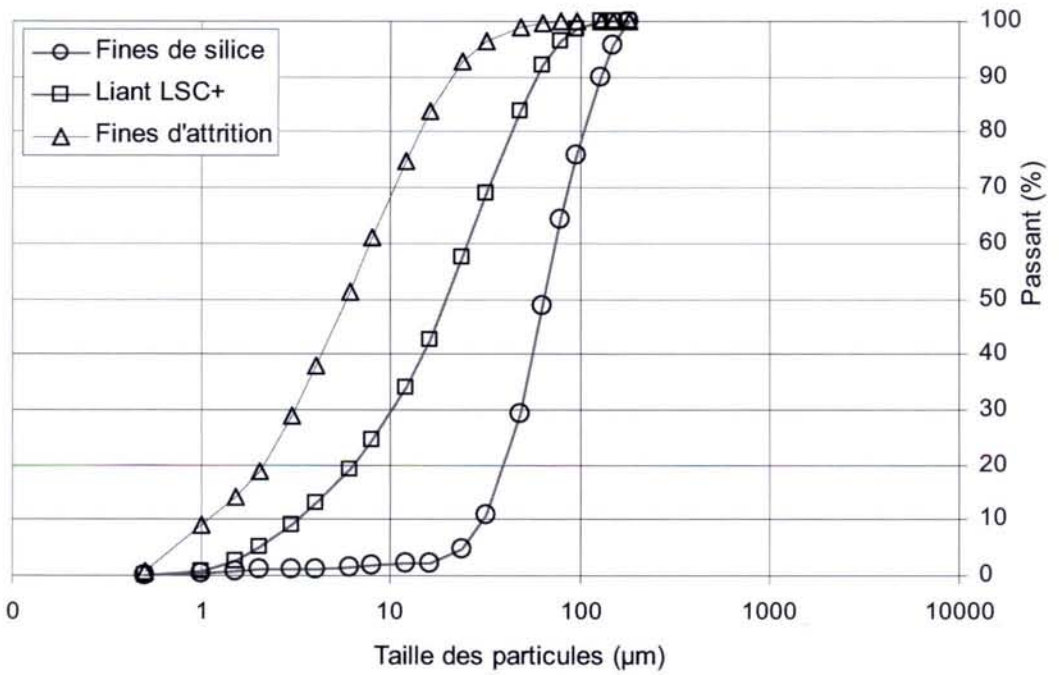
La granulométrie laser de ces produits est donnée dans le tableau (***tab.33-1***) et sur la figure (***fig.33-1***).

[1] Liant hydraulique spécial routier développé par la société Holcim

tab.33-1 : Analyse granulométriques laser du liant routier LSC+, des fines siliceuses témoin et des fines calcaires d'attrition

Analyse granulométrique laser du liant LSC +							
Taille (µm)	**Passant (%)**	**Taille (µm)**	**Passant (%)**	**Taille (µm)**	**Passant (%)**	**Taille (µm)**	**Passant (%)**
0,500	*0,00*	3,000	*9,12*	16,000	*42,77*	80,000	*96,29*
1,000	*0,69*	4,000	*12,91*	24,000	*57,57*	96,000	*98,55*
1,500	*2,67*	6,000	*19,14*	32,000	*68,79*	128,000	*100,00*
2,000	*4,89*	8,000	*24,47*	48,000	*83,72*	150,000	*100,00*
		12,000	*34,03*	64,000	*91,91*	180,000	*100,00*
Analyse granulométrique laser des fines de silice							
Taille (µm)	**Passant (%)**	**Taille (µm)**	**Passant (%)**	**Taille (µm)**	**Passant (%)**	**Taille (µm)**	**Passant (%)**
0,500	*0,02*	3,000	*1,12*	16,000	*2,25*	80,000	*64,33*
1,000	*0,45*	4,000	*1,26*	24,000	*4,78*	96,000	*75,86*
1,500	*0,74*	6,000	*1,51*	32,000	*10,77*	128,000	*90,04*
2,000	*0,91*	8,000	*1,73*	48,000	*29,33*	150,000	*95,57*
		12,000	*1,99*	64,000	*48,68*	180,000	*100,00*
Analyse granulométrique laser des fines d'attrition							
Taille (µm)	**Passant (%)**	**Taille (µm)**	**Passant (%)**	**Taille (µm)**	**Passant (%)**	**Taille (µm)**	**Passant (%)**
0,500	*0,57*	3,000	*28,99*	16,000	*83,61*	80,000	*99,88*
1,000	*9,12*	4,000	*37,90*	24,000	*92,94*	96,000	*99,88*
1,500	*14,24*	6,000	*51,24*	32,000	*96,53*	128,000	*100,00*
2,000	*18,73*	8,000	*60,90*	48,000	*98,82*	150,000	*100,00*
		12,000	*74,64*	64,000	*99,55*	180,000	*100,00*

fig.33-1 : granulométrie des différents produits



3322) Mélanges étudiés

Les formules étudiées (***tab.33-2***) sont soit une pâte pure, soit une pâte dans laquelle 10% de la phase minérale a été substitué par des fines siliceuses ou calcaires. Ce taux de 10 % a été choisi arbitrairement. Il est sensé représenter la part de fines d'attrition créées durant les actions de malaxage et de mise en œuvre.

L'eau a été ajustée de sorte que les mélanges soient facilement oeuvrables, sans ressuage important. Après essai, nous avons fixé une valeur constante de 37 p.p.c relativement à la phase minérale, soit un rapport massique Eau/Phase minérale = 0,51.

Le moulage des éprouvettes a été réalisé dans des pots en polypropylène. Nous avons pris la précaution d'effectuer une mise en dépression modérée (350 mm de Hg) immédiatement après coulage, pendant une minute pour évacuer le maximum d'air occlus possible. Les éprouvettes ont été scellées et conservées à 20 °C jusqu'au moment des essais.

tab.33-2 : mélanges réalisés

Quantités exprimées en grammes

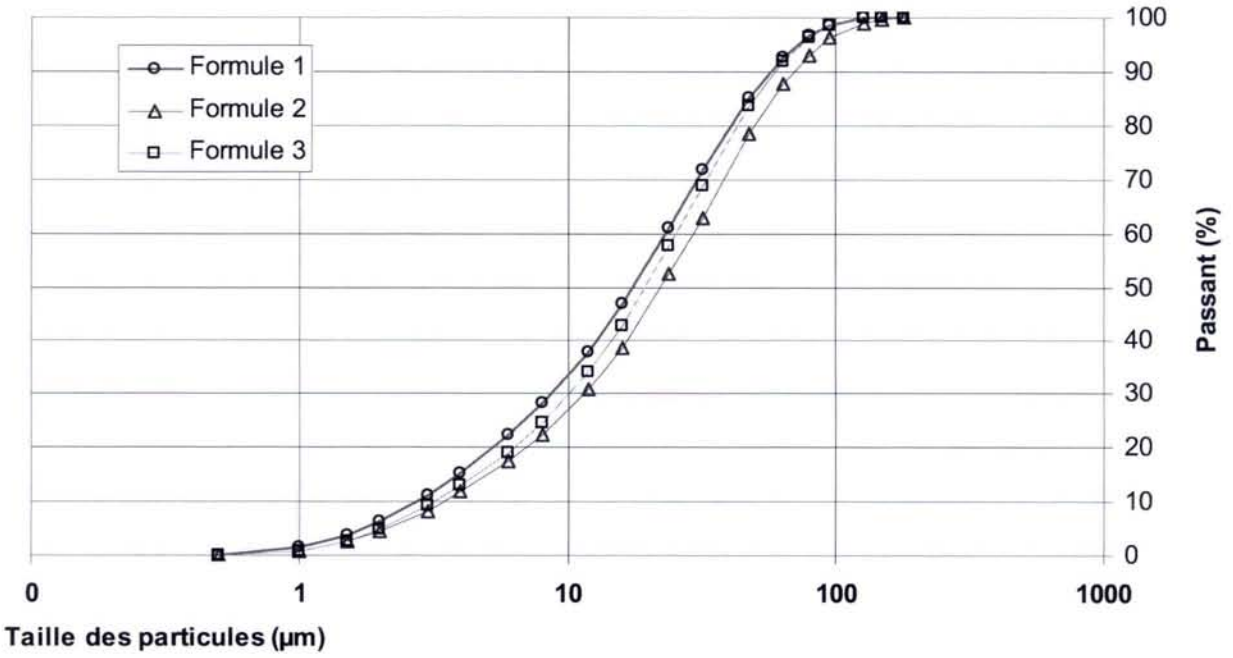
	Formule 1	Formule 2	Formule 3
Liant LSC +	900	900	1000
Fines calcaires d'attrition	100	0	0
Fines de silice	0	100	0
Eau	370	370	370

Les courbes de recomposition granulaire des mélanges sont portées sur la figure (***fig.33-2***). Elles ont été construites à partir de la pondération de chacun des constituants pour les différents diamètres de particules (***tab.33-3***). Comme le liant occupe une part importante (90 %), les courbes de recompositions sont peu différentes les unes des autres et proches de la courbe de référence qui est celle du liant seul.

tab.33-3 : recompositions granulaires des trois formulations envisagées

	Constituants (P%)			Recompositions granulaires (P%)		
Taille (µm)	Fines silice	Fines d'attrition	Liant LSC +	1	2	3
0,500	0,02	0,57	0,00	0,06	0,00	0,00
1,000	0,45	9,12	0,69	1,53	0,67	0,69
1,500	0,74	14,24	2,67	3,83	2,48	2,67
2,000	0,91	18,73	4,89	6,27	4,49	4,89
3,000	1,12	28,99	9,12	11,11	8,32	9,12
4,000	1,26	37,90	12,91	15,41	11,75	12,91
6,000	1,51	51,24	19,14	22,35	17,38	19,14
8,000	1,73	60,90	24,47	28,11	22,20	24,47
12,000	1,99	74,64	34,03	38,09	30,83	34,03
16,000	2,25	83,61	42,77	46,85	38,72	42,77
24,000	4,78	92,94	57,57	61,11	52,29	57,57
32,000	10,77	96,53	68,79	71,56	62,99	68,79
48,000	29,33	98,82	83,72	85,23	78,28	83,72
64,000	48,68	99,55	91,91	92,67	87,59	91,91
80,000	64,33	99,88	96,29	96,65	93,09	96,29
96,000	75,86	99,88	98,55	98,68	96,28	98,55
128,000	90,04	100,00	100,00	100,00	99,00	100,00
150,000	95,57	100,00	100,00	100,00	99,56	100,00
180,000	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

fig.33-2 : courbes granulométriques de recomposition des phases minérales de chaque formule



3323) Essais mécaniques

Les éprouvettes ont été sollicitées en compression diamétrale. Les essais ont été étalés sur trois mois. L'ensemble des mesures est reporté dans le tableau suivant (***tab.33-4***). Un seul essai a été réalisé par échéance, mais la cohérence des mesures a été vérifiée sur l'ensemble des résultats dans le temps (7 valeurs).

tab.33-4 : mesures et résultats des essais mécaniques

formules	éprouvette	âge (j)	hauteur (cm)	diamètre (cm)	masse (g)	force de rupture (daN)	MVa humide (g/cm^3)	Rtb (Mpa)
F1	1	7	4,333	5,465	198,5	700	1,953	1,882
	2	14	4,213	5,45	195,8	959,4	1,992	2,660
	3	21	4,163	5,437	190,9	832,6	1,975	2,342
	4	28	3,968	5,471	184,1	624,7	1,974	1,832
	5	42	3,81	5,413	175,8	525,8	2,005	1,623
	6	60	3,781	5,444	175,6	467,1	1,995	1,445
	7	90	4,023	5,456	186,5	557,8	1,983	1,618
F2	1	7	4,141	5,412	189,4	672	1,988	1,909
	2	14	4,213	5,412	193,5	1148	1,997	3,205
	3	21	4,26	5,431	192,4	1271	1,950	3,497
	4	28	4,528	5,446	203,2	1185	1,927	3,059
	5	42	4,355	5,47	200	1083	1,954	2,894
	6	60	4,51	5,412	206,9	1046	1,994	2,728
	7	90	4,062	5,444	186,6	948,1	1,974	2,729
F3	1	7	4,358	5,464	199,1	622	1,948	1,663
	2	14	4,528	5,453	208,7	1489	1,974	3,839
	3	21	4,332	5,436	200,6	1168	1,995	3,158
	4	28	4,389	5,471	203,9	1027	1,976	2,723
	5	42	4,202	5,433	194,9	626,9	2,001	1,748
	6	60	4,421	5,448	205,9	556,9	1,998	1,472
	7	90	4,527	5,467	209,6	586,4	1,972	1,508
						moyenne	1,98	
						Ecart type	0,02	

Les deux figures ci-dessous (***fig.33-3 et 4***) représentent respectivement l'évolution des performances mécaniques en traction et les MVa humides relevées avant écrasement des éprouvettes, dans le temps. Cette dernière mesure a été effectuée pour vérifier qu'il n'y avait pas de variation trop importante entre éprouvettes. On constate que la MVa humide se situe dans une même fourchette, avec un écart type de 0,02. Ce résultat peut être

considéré comme très bon, compte tenu notamment des difficultés de la mesure (méthode de la « surface sèche »).

fig.33-3 : évolution des performances mécaniques des formules 1, 2 et 3

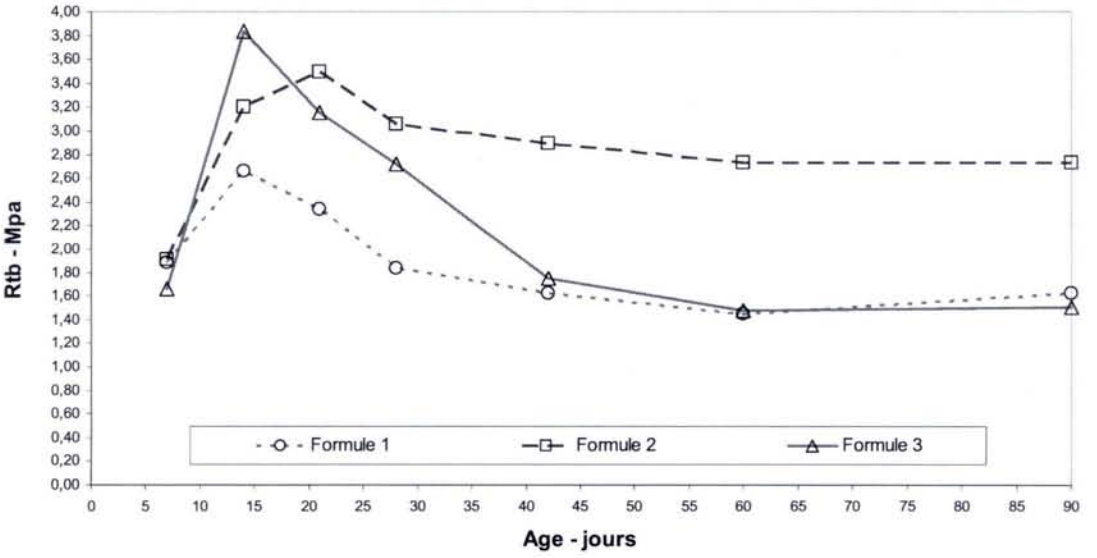
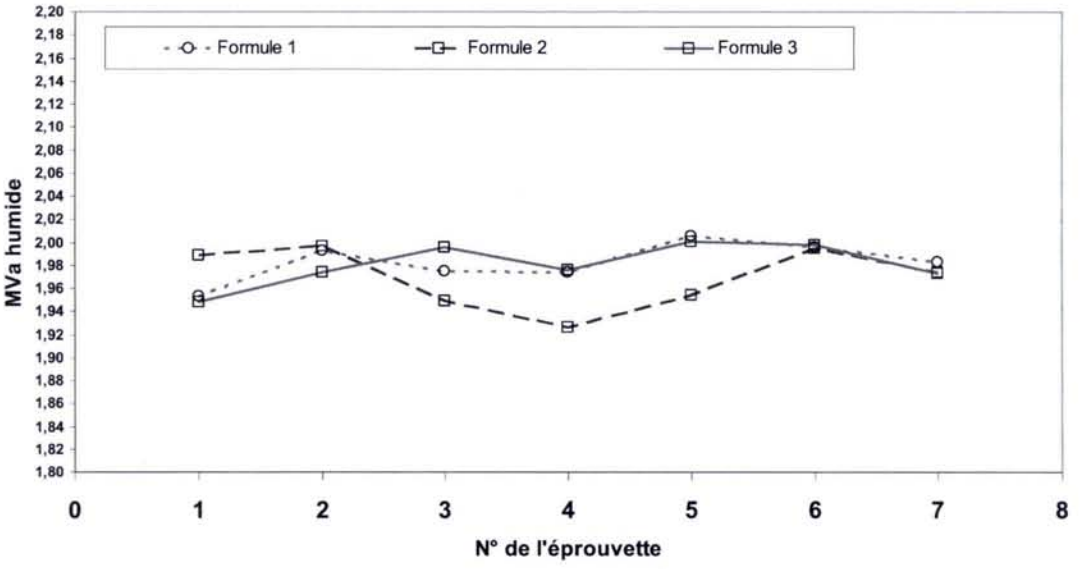


fig.33-4 : vérification de la MVa des éprouvettes avant leur sollicitation mécanique



3324) Résultats

En se référant aux travaux de B. Haguenauer [***L-1***] évoqués précédemment, on peut prétendre que les fines calcaires, compte tenu de leur granulométrie, ne sont pas constituées que de cristaux de calcite, mais qu'elles contiennent aussi des fines argileuses, des oxydes métalliques, etc. Ces éléments peuvent être source de complications lors de la prise des liants, notamment si ces derniers ne comportent pas une fraction de CaO suffisante pour le maintient du pH ou pour assurer la floculation des argiles (on peut faire ici un parallèle avec les techniques de traitements mixtes de sols argileux).

L'interprétation du graphique des performances est délicate. Plusieurs observations peuvent être relevées. Tout d'abord, les performances mécaniques montent vite jusqu'à 14 jours, pour la pâte pure et la pâte avec fillers calcaires, ou 21 jours pour la pâte avec fillers siliceux. Ensuite, la résistance régresse (?) de manière différente selon les mélanges, et se stabilise à une valeur qui semble stable dans le temps. D'un point de vue technique, rien d'anormal n'a été détecté : température constante, pas de dessiccation, pas de chocs et pas de pollution des mélanges. Nous n'avons donc pas trouvé d'explication à ce phénomène.

La baisse de résistance est la plus importante pour la pâte pure. Par référence à ce produit, on constate alors que les fines siliceuses permettent un gain substantiel de résistance, que l'on peut attribuer à un effet « mortier » des grains assez homothétiques, de tailles supérieures à celles du liant (***fig.33-1***). La forme arrondie des grains permet peut être d'améliorer aussi la compacité au mélange. Enfin, une bonne adhérence chimique, alliée à une forte résistance mécanique des grains, peut expliquer également ce surcroît de performance.

Pour le mélange avec fines « calcaires » de faible résistance mécanique, les performances à court terme sont moindres. Par contre, elles rejoignent dans le temps celles de la pâte pure (voire la dépasse). Il y a donc un effet manifeste sur la cinétique de durcissement que l'on peut attribuer à un *effet liant* des fines calcaires, dû peut être à l'apparition de phases minérales résistante, de type carboaluminates par exemple. En tout état de cause, d'après cette expérience, les fines d'attrition pouvant être générées lors des

diverses phases de mise en œuvre n'affectent donc pas à terme le *durcissement* des mélanges calcaires.

333) EMERGENCE CRISTALLINE

En complément des travaux précédents, nous avons voulu chercher la présence de cristaux liés à d'éventuelles réactions entre le liant et les fines. Le principe étant d'effectuer des études de diffraction de rayons X sur les différents produits. La comparaison des spectres aurait pu nous renseigner sur la présence ou non de phases spécifiques (pour autant que les quantités soient significatives et que les pics caractéristiques ne soient pas noyés dans le bruit de fond du spectre). Cette étude se voulait a priori qualitative mais pouvait éventuellement se révéler quantitative si les pics étaient clairement visibles.

Le principe de cette analyse repose sur la comparaison des spectres des produits suivants :

Produits de base (étalons) :

1) Liant hydraulique anhydre : reconnaissance du produit liant non hydraté
2) Liant hydraulique hydraté et durcis : mise en évidence des espèces cristallines, ce mélange étant le témoin.
3) Fines : reconnaissance de la nature chimique des grains susceptibles d'interagir. Dans notre contexte, il s'agissait des fines d'attrition mais également des fines (0/80 µm) obtenues par criblage de la fraction sable.

Mélanges :

- Mélange [liant hydraulique + fines] : en « soustrayant » les spectres 2) et 3) au spectre du mélange, les « résidus » seraient les produits générés par la réaction chimique du liant avec sa charge minérale.

Ces analyses n'ont pas été engagées mais restent un sujet à explorer pour une prochaine thèse plus fondamentale.

3 – 4 EVOLUTIONS GRANULAIRES DES MATERIAUX AU COMPACTAGE

341) PRESENTATION

Les moyens actuels de mise en œuvre des MTLH et GNT sont extrêmement puissants. Les engins de chantier sont de deux types : les compacteurs vibrants et les compacteurs à pneus. Les premiers sont des matériels dynamiques alors que les seconds sont des matériels à effet statique.

La mise en place des matériaux par ces engins risque de faire évoluer la granularité. La bibliographie, que nous avons trouvée, relative à ce sujet [***M-1***] et [***M-2***] fait apparaître que cette évolution granulométrique, durant la fabrication et la mise en œuvre, est liée à divers paramètres qui sont :

- La courbe granulométrique initiale du produit,
- Les caractéristiques intrinsèques mécaniques des granulats utilisés,
- La nature minéralogique des grains,
- La teneur en eau du mélange,
- L'énergie de compactage.

A notre niveau, l'analyse de ce problème ne peut se faire raisonnablement qu'en laboratoire, étant donné les moyens nécessaires sur chantier pour limiter la dispersion liée à la non maîtrise nombreux paramètres extérieurs (la météorologie par exemple qui modifie la teneur en eau ...).

Nous avons toutefois tenté cette expérience sur une GNT à base de granulats calcaires très tendres. Le but de la manipulation était de vérifier par deux analyses granulométriques successives l'évolution de la granularité, avant et après compactage sur chantier.

La méthode mise en oeuvre consistait à positionner des bacs en aluminium au moment du répendage, bacs qui ont été récupérés ensuite après le passage des compacteurs (le matériau ayant subi le même traitement que l'assise, a priori).

Cette expérience n'a pas été concluante en raison des difficultés matérielles rencontrées :

- non stabilité des bacs
- écrasement des bords
- ségrégation interne
- effet d'enclume à la base

Suite à cette tentative, aucun résultat fiable n'a donc pu être tiré.

Signalons cependant que dans le cadre interne de l'entreprise, le laboratoire a mis au point un document rassemblant quelques principes et précautions concernant la mise en œuvre et le compactage des matériaux calcaires locaux [***M-3***].

Deux études bibliographiques pertinentes peuvent toutefois apporter un éclairage original à ce problème, d'autant que les matériaux utilisés concernent pour partie la gamme des calcaires lorrains. Ces travaux sont reportés ci-après.

342) Première étude bibliographique [M-1]

L'expérience se déroule dans le cadre d'un chantier autoroutier de GTLH, pour lequel les techniciens en charge du suivi qualitatif ont voulu reproduire en laboratoire les modifications granulaires observées sur chantier. En effet ces techniciens se sont aperçus qu'il existait une similitude entre l'évolution du produit soumis au compactage in situ, et l'évolution du même matériau soumis aux manipulations lors de l'étude des MTLH.

En laboratoire, le mode opératoire retenu est le suivant :

- Dans un récipient, on incorpore tous les constituants solides de la formule. La courbe granulométrique est soit vérifiée à ce stade, soit déduite du calcul de la reconstitution granulaire.
- Ensuite, ce mélange est versé dans un malaxeur à graves de type MLPC. L'eau, en quantité généralement équivalente à la référence Protor modifié, est introduite au malaxage.

- Le produit, en fin de malaxage, est placé dans un moule et le mélange est compacté à l'aide d'un compacteur de graves de type MLPC.
- Une seconde analyse granulométrique est alors réalisée.

La conclusion de cet article était que peu de différences existaient entre le produit ainsi obtenu et celui qui résulte du passage des engins de compactage sur le chantier.

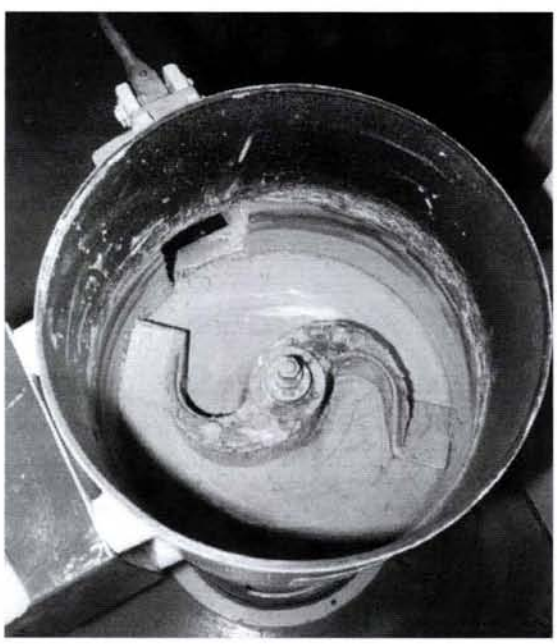
Mon expérience de 12 années durant lesquelles j'ai utilisé cette chaîne d'appareillage m'incite à penser que ce procédé est certes efficace pour la réalisation des éprouvettes, mais trop imprécis pour fonder un plan d'expérience fiable. Les difficultés sont les suivantes :

- maîtrise des courbes des constituants de départ,
- récupération de toutes les fines dans le malaxeur à l'issue du malaxage (***fig.34-1***),
- maîtrise de la ségrégation granulaire à la jetée du mélange dans l'éprouvette,
- compactage constant avec le compacteur de graves (***fig.34-2***).

fig.34-1 : malaxeur de grave type MLPC en service

Sur les photos, on constate qu'une partie des fines est perdue.

Vue du dessus



Vue sur la trappe de sortie de la gâchée

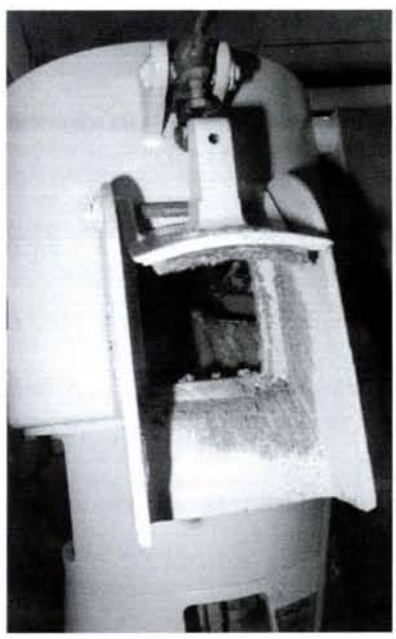
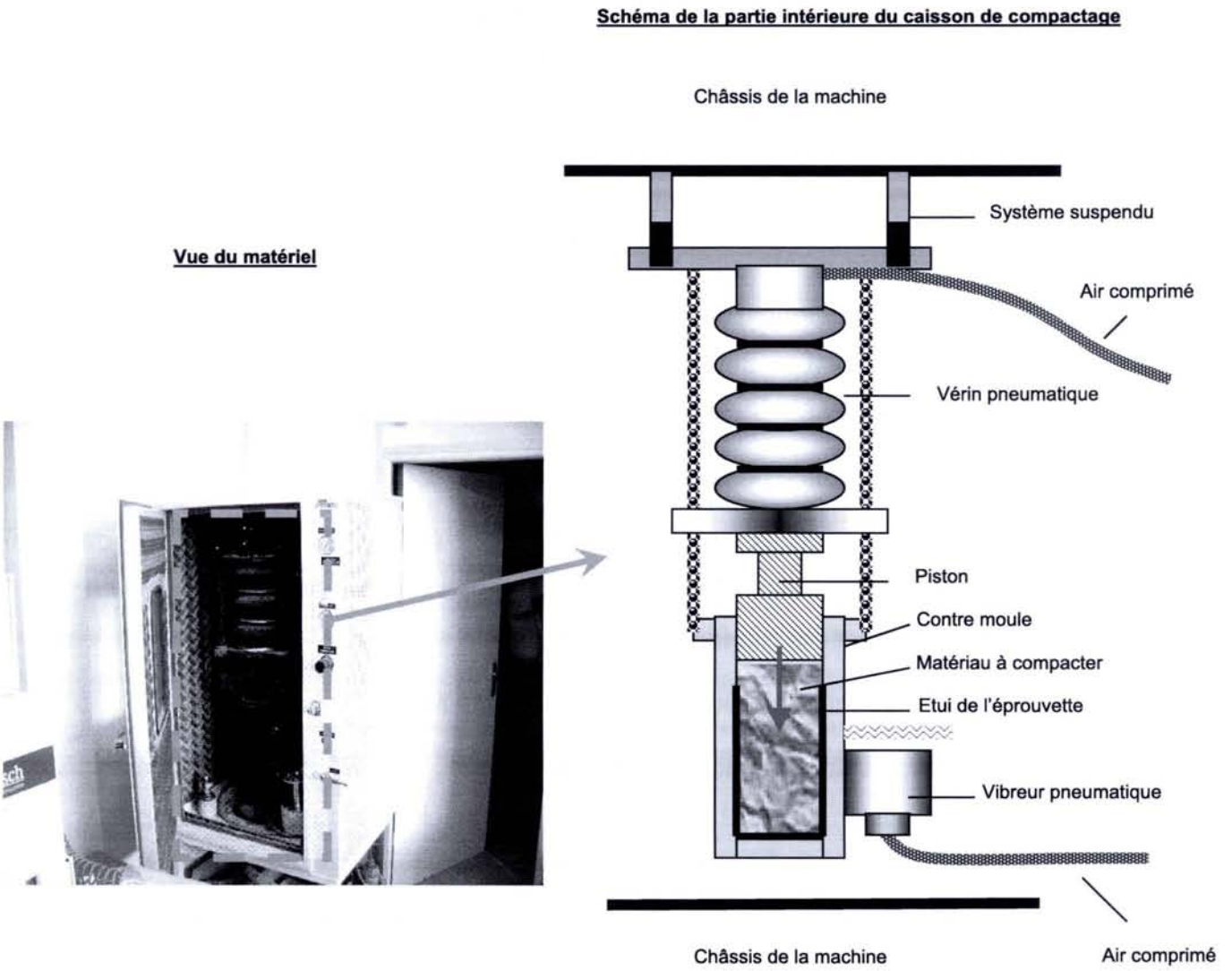


fig.34-2 : compacteur de grave de type LCPC



343) Seconde étude bibliographique [M-2]

L'étude à laquelle il est fait référence ici [***M-2***] repose sur l'observation de l'évolution granulométrique d'une GNT durant sa mise en œuvre, en fonction d'un certain nombre de paramètres. Ce travail est riche en informations et il est en adéquation avec notre thème de recherche. Le fait qu'il traite de GNT n'est pas un handicap car une grave traitée se comporte comme une GNT tant qu'elle n'a pas fait prise.

Les divers paramètres qui ont été considérés dans cette étude sont les suivants :

- Les matériaux

  Les matériaux étudiés sont des GNT 0/20. Les granulats employés ont des LA allant de 13 à 40 %.

- Support et épaisseur de mise en œuvre

  Les matériaux ont été mis en œuvre dans les fosses d'essais du Centre d'Expérimentations Routières de Rouen. Le sol support a une déflexion de l'ordre de 50/100e de millimètre. L'épaisseur de mise en œuvre est de 30 cm (compacté).

- Formulations étudiées

  Différentes courbes de recomposition ont été envisagées : courbe dite « bien graduée moyenne » et courbe dite « creuse » (entendre : pauvre en sable). Les mélanges ont été fabriqués en centrale.

- Moyens de mise en œuvre et contrôles des MVa

  Deux types de compacteurs ont été utilisés ; un RV4 et un RV2. Le réglage des engins est amplement développé dans l'article. La qualité du compactage de la partie haute et de la partie basse de la couche mise en œuvre a été contrôlée au moyen de gamma-densimètres. Ces contrôles ont permis de définir le nombre de passes des engins en fonction du *taux de compactage* souhaité (rappel : le taux de compactage est le rapport entre la MVa en place et celle définie lors de l'étude Proctor. Cette valeur est alors comparée avec *l'objectif* à obtenir qui est la *qualité* de compactage (Q1, Q2, etc.) – Le taux de compactage est donc différent de la compacité qui est le rapport entre la MVa de l'étude proctor et la *MVR* du mélange considéré).

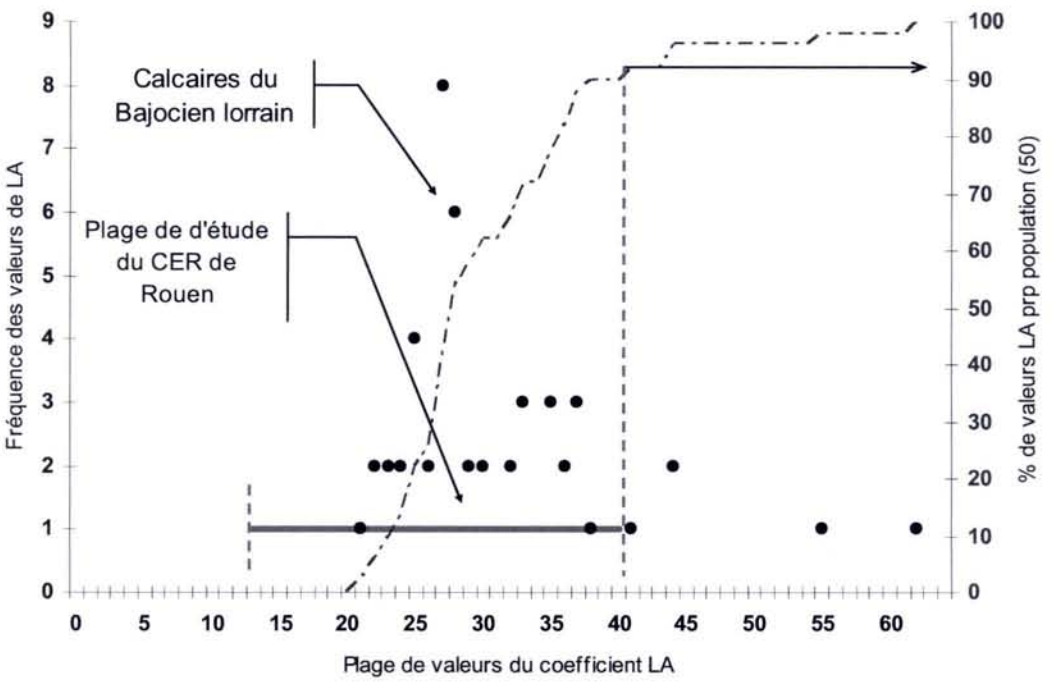
Concernant les calcaires du Bajocien lorrain, le tableau suivant résume les valeurs de LA caractéristiques tirées de notre base de données. Elles sont comprises entre 22 et 62 (***tab.34-1***). Un traitement statistique de ces données montre (***fig.34-3***) que 90 % des valeurs entrent dans la plage d'étude de cet article. On peut donc considérer cette étude comme particulièrement représentative pour nos matériaux.

tab.34-1 : valeurs de LA de divers faciès calcaires du bajocien lorrain

(Spectre non exhaustif – base de données présentées dans nos travaux)

Divers Faciès du bajocien lorrain	Coefficients LA enregistrés										
Oolithe de jaumont	44										
Calcaire siliceux de l'Orne	28										
Calcaires du Haut Pont	28	36									
Calcaire d'Ottange	37	62									
Bâlin (oolithe miliaire inférieure)	24	25	27	28	38						
Oolithe miliaire supérieure	29	44	55								
Polypiers supérieurs	23	25	25	26	28	29	32	35	36	37	41
Polypiers inférieurs	21	23	24	27	27	27	28	28	33	35	
Oolithe cannabine	27	30	33								
Oolithe blanche	22	33	35								
Calcaire à entroques	22	27	30	32							
Calcaires gréseux	25	26	27	27	37						

fig.3 : superposition des caractéristiques des granulats utilisés durant l'expérimentation du CER de Rouen avec celles des granulats calcaires du bajocien lorrain



La méthode de quantification de la variation granulaire adoptée est basée sur la somme des écarts des *tamisats* déterminés avant et après une expérimentation.

Les mailles de contrôle retenues sont les suivantes :

Tamis (mm)	0.08	0.100	0.200	0.500	1.000	2.000	5.000	10.000	16.000	20.000
Indexation (i)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

L'évolution globale E, est exprimée de la manière suivante :

$$\mathbf{E}\ (\%) = \sum_{I=1}^{10} \Delta_i \quad \text{avec} \quad \mathbf{\Delta}_i\ (\%) = [\text{Tamisat (\%) après essai} - \text{Tamisat (\%) avant essai}]$$

(vérification effectuée sur 10 tamis)

Les divers essais réalisés montrent que l'évolution granulaire dépend des facteurs suivants :

- Tout d'abord, la granularité évolue en fonction de la dureté des matériaux et de l'énergie de compactage.
- L'évolution est d'autant plus importante que la courbe de départ est creuse (ceci est d'autant plus vrai que les LA sont élevés)
- Lors de l'essai Proctor, l'évolution granulaire est peu sensible à la nature de la courbe de recomposition si LA < 24.
- In situ, comme pour l'essai Proctor, la variation est moindre dans le cas de courbes moyennes pour les granulats de LA < 24.
- Les variations granulaires au tamis de 80 µm sont moindres in situ que lors de l'essai Proctor.
- La densification en place des matériaux ne dépend pas, significativement, de la nature minéralogique des granulats. Elle dépend uniquement de la granularité des formules et de l'angularité des granulats.
- Enfin, les auteurs concluent « ***qu'il est permis de penser en règle générale que dans le cas des graves satisfaisant aux spécifications*** (entendre : dont

la courbe granulaire de recomposition s'inscrit le mieux possible au centre du fuseau 1 proposé pour les graves traitées), ***le compactage en place ne conduit pas à des évolutions de granularité significatives*** ».

Une granularité optimisée semble donc être la clé de la stabilité granulométrique des GNT (et des MTLH) dont les granulats sont de caractéristiques mécaniques médiocres durant leur mise en œuvre et leur compactage.

Les granulats calcaires du Bajocien lorrain ont des LA majoritairement supérieurs à 24. Par conséquent, il convient, pour limiter leur trop grande évolution granulaire durant la mise en œuvre, d'éviter les mélanges conduisant à une courbe de recomposition trop creuse, et ce pour deux raisons :

- la difficulté à établir en laboratoire les références de compactage avec l'essai Proctor modifié, à cause d'une évolution granulaire non constante entre chacun des points,
- les différences granulaires qui apparaissent entre la mise en œuvre au compacteur de grave (moulage d'éprouvettes aux paramètres OPM pour les essais mécaniques) et la mise en œuvre sur chantier, et qui conduisent à des squelettes et densifications différents et donc, à des performances mécaniques différentes.

Il convient donc de formuler, autant que possible, les GTLH à base de calcaires lorrains par référence au fuseau n° 1 de la norme NF P 98-116, et ce d'autant plus que le LA des gravillons est élevé.

En revanche, si les matériaux à courbes creuses (ou dessablés) peuvent avoir l'avantage d'être moins sensibles à l'eau (caractère drainant), les formulations « plus pleine » seront sensibles à tous dépassement des références Wopm et aux conditions climatiques (pluviométrie) de mise en œuvre. Ce comportement peut conduire à un choix sélectif d'une technique d'assise en fonction des conditions climatiques (hiver, été).

Les conditions optimales de mise en œuvre des granulats calcaires lorrains dans les techniques de GTLH et de GNT sont donc les suivantes :

- Recomposition granulaire des produits la plus proche possible du centre des fuseaux normatifs (si possible le fuseau n° 1 pour le GTLH). Pour cela, il faut privilégier la recomposition d'au moins deux fractions granulaires.
- Les mélanges doivent être fabriqués en centrale de malaxage et la teneur en eau du produit malaxé doit être maîtrisée.
- Les matériaux doivent être mis en œuvre par conditions climatiques favorables (ni pluie, ni évaporation importante)
- Rappelons qu'à la fin du compactage, un enduit de cure (gravillonné pour permettre la circulation sur la couche) doit immédiatement être mis en place pour deux raisons : protéger le matériau de la dessiccation (défaut de prise des graves traitées) et protection en cas de pluie. Compte tenu du caractère très basique du produit (liant hydraulique et granulats calcaires), des émulsions de bitume pour imprégnation sont mises au point pour éviter la remontée *flash* du pH qui provoque une peau non adhérente au support.

PARTIE 4

PUBLICATIONS

Cette dernière partie du mémoire regroupe trois publications réalisées durant ces travaux. Elles contiennent des résultats scientifiques non présentés précédemment.

La première, intitulée « Prévision de la résistance à long terme de mélanges routiers traités aux liants hydrauliques » [J. Voirin – D. Desmoulin – A. Lecomte] a été publiée dans le Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées n° 221 de mars – avril 2001, pages 3 à 16.

Elle concerne des travaux relatifs à la cinétique de durcissement des GTLH, et plus précisément, les coefficients de correspondances normatifs utilisés pour la prévision à long terme de la résistance à la traction à partir d'essais à plus courts termes.

La plupart des matériaux ayant servi aux expérimentations sont présentés dans la base de donnée de la partie 3-1.

L'étude montre clairement que la cinétique de durcissement des MTLH dépend du couple liant - granulat. En particulier, les granulats calcaires en présence d'un liant riche en laitier présente des coefficients bien supérieurs aux valeurs normatives, ce qui a pour conséquence une surestimation des performances finales. A l'inverse, les performances maximales sont atteintes plus rapidement.

Cette publication a fait l'objet d'une présentation circonstanciée de Pierre Bense, Directeur du laboratoire central de SCREG et d'un avant propos de Jean François Corté, Directeur Technique chargé du domaine routier au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

Elle a suscité de nombreuses réactions favorables dans le domaine professionnel.

La seconde publication, intitulée « Classification des GTLH calcaires et propriétés intrinsèques des gravillons » [J. Voirin – A. Lecomte – D. Desmoulin] a été soumise en janvier 2004 au Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées. Elle s'intéresse aux relations entre les performances mécaniques des GTLH calcaires et les caractéristiques intrinsèques des gravillons.

Elle montre tout d'abord que l'expérience permet d'obtenir des mélanges dont les performances mécaniques en traction sont satisfaisantes (classification G3, voire G4

selon la NF P 98-116) avec des gravillons calcaires classés F, c'est-à-dire écartés a priori pour les assises routières. Ces mélanges ayant des taux de liants ordinaires.

Les caractéristiques LA, et surtout MDE pour les calcaires lorrains sont donc discriminatoires. En revanche, d'après nos résultats, le facteur limitant l'emploi de ces matériaux en technique de MTLH serait plutôt la résistance à la traction de la roche.

La dernière publication concerne un article intitulé « Analyse des propriétés des grains par mesure de la compacité des tranches granulaires » [A. Lecomte – J.M. Mechhling – J. Voirin – N. Vulcano] paru en avril 2000 dans la revue Française du Génie Civil (V 4, n°2-3, page 221, 229).

Il s'agit d'une étude réalisée parallèlement à nos travaux, sur la mesure de la compacité des tranches granulaires. Cette mesure est utilisée en particulier dans le modèle *d'empilement compressible* du LCPC, qui permet de décrire la structure granulaire de tout mélange et de calculer notamment sa compacité.

Les mesures de cet article pourraient devenir alors un moyen privilégié pour aboutir aux choix des constituants qui conduisent par exemple à la plus faible attrition durant la mise en œuvre, selon les expériences relatées précédemment (§ 3-3 et 3-4).

PUBLICATION 1

Prévision de la résistance à long terme de mélanges routiers traités aux liants hydrauliques (2001)

Prévision de la résistance à long terme de mélanges routiers traités aux liants hydrauliques

Jean VOIRIN
Chef de section
Laboratoire SCREG EST, Nancy
Doctorant, Université Henri Poincaré, Nancy 1

Didier DESMOULIN
Directeur technique
Laboratoire SCREG EST, Nancy

André LECOMTE
Maître de conférence, HDR
EGA/IUT Génie civil de Nancy Brabois

RÉSUMÉ

Les laboratoires routiers d'entreprise ont accumulé au fil des années nombre d'études sur les matériaux traités aux liants hydrauliques (MTLH). Ces données sont d'un grand intérêt pour compléter ou réactualiser les documents techniques officiels. L'étude proposée est tirée de la base de données du laboratoire SCREG EST de Nancy. Il s'agit de plus de 2 000 mesures de résistance à la traction pratiquées dans le temps sur divers MTLH formulés avec plusieurs natures de granulats et différents liants. Ces valeurs traitées statistiquement permettent de statuer sur la pertinence du coefficient de correspondance Rt_t/Rt_{360} proposé par les normes et leur guide d'application. Ce coefficient est vérifié pour les matériaux de type siliceux. Il conduit, en revanche, à surestimer les performances mécaniques à long terme des MTLH à base de granulats calcaires. De nouvelles valeurs sont proposées pour une vingtaine de mélanges différents.

MOTS CLÉS : *36-61 - Granulat - Calcaire - Liant hydraulique routier - Mélange hydraulique - Assises de chaussées - Traction directe - Fendage - Coefficient de correspondance.*

Avant-propos

Jean-François CORTÉ
Directeur technique
Chargé du domaine Routes
Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

L'incidence de la nature pétrographique des granulats et du liant hydraulique sur la cinétique d'évolution des caractéristiques de rigidité et de résistance des graves traitées aux liants hydrauliques a été mise en évidence depuis longtemps. On pourra se reporter, par exemple, à certains articles rassemblés dans le numéro spécial (Spécial XVIII) du bulletin des LPC. C'est la diversité des résultats qui avait conduit, dans le guide technique « Conception et dimensionnement des structures de chaussées neuves » *de 1994 et dans les normes de produits sur les matériaux traités aux liants hydrauliques, à ne faire figurer qu'un couple de valeurs indicatives par type de liant pour les coefficients destinés à apprécier les caractéristiques à un an des mélanges à partir de résultats à plus court terme.*

L'article de MM. Voirin, Desmoulin et Lecomte a le mérite de présenter une synthèse s'appuyant sur un nombre élevé de résultats obtenus surtout pour des granulats calcaires. Cette information fournit des références très utiles afin d'éviter une appréciation trop optimiste des caractéristiques par l'application directe des coefficients proposés dans les normes de produits. Souhaitons que cet exemple puisse susciter la réalisation et la publication d'autres synthèses régionales.

L'évolution quasi constante des liants hydrauliques spéciaux à usage routier doit cependant inciter chacun à se souvenir qu'en matière d'étude des matériaux traités aux liants hydrauliques pour le dimensionnement des chaussées, la règle première est toujours de chercher à s'appuyer sur des performances mesurées à un an.

Présentation

Pierre BENSE
Directeur du Laboratoire central SCREG

L'article présenté ici, extrait du travail de thèse de Jean Voirin [1], est tout particulièrement intéressant et c'est une étape importante pour la rédaction d'un jeu de normes françaises qui cherche à être toujours plus précis.

Les auteurs se sont, en effet, attachés à mesurer, vérifier et expliquer les observations souvent faites dans les laboratoires routiers, qu'ils soient issus de l'Administration ou des entreprises, concernant les écarts enregistrés entre une évaluation de la résistance faite par extrapolation et la mesure exacte.

Ce travail gigantesque (avec près de 2 000 mesures) et patient, puisqu'il est le recueil d'une dizaine d'années de travail, apporte un éclairage objectif sur des aspects « admis faute d'autres résultats ».

On sait désormais que :

- la nature des granulats influe directement sur le coefficient d'estimation,
- la nature du liant et sa « rapidité » font de même,
- le type de gisement a aussi son influence,
- les coefficients des normes sont globalement un peu faibles par rapport à la réalité et qu'en conséquence, l'estimation des performances à long terme est plutôt optimiste.

Il ne sert à rien, alors, de se cacher la réalité et toute la profession routière, entreprises, maîtres d'ouvrage et laboratoires privés ou publics ont tout intérêt à en tenir compte.

C'est par cette voie et ce type d'approche que la technique routière française continuera de rester, de par le monde, la référence sérieuse.

Il appartient désormais aux services compétents d'apporter leur propre contribution à ce travail, d'une part, en confrontant ces résultats avec leurs propres banques de données pour vérifier et, peut-être, encore affiner les résultats obtenus et, d'autre part, de tenir compte des nouveaux coefficients et de la nouvelle approche ici proposés, ceci lors de la prochaine révision des normes relatives aux assises traitées aux liants hydrauliques.

La recherche de l'utilité de ce travail est le vœu le plus cher de toute l'équipe qui a participé à cette volumineuse et patiente étude.

Introduction

Le travail proposé est une synthèse des performances mécaniques mesurées à 28, 60 et 360 jours sur une série de matériaux traités aux liants hydrauliques (MTLH) formulés à partir de différents granulats et liants hydrauliques. Ces essais ont permis d'étudier la pertinence du coefficient de correspondance utilisé en technique routière pour calculer la résistance à long terme des MTLH. Il est fondé sur plus de 2 000 essais effectués durant plusieurs années au laboratoire nancéien de la société SCREG EST. Ces MTLH proviennent de tout l'Est de la France et ils ont été réalisés avec des granulats issus de roches alluvionnaires ou massives, de nature siliceuse ou calcaire, et des liants hydrauliques routiers ou des ciments normalisés.

Rappelons que les structures de chaussées sont calculées à partir des performances mécaniques des produits à 360 jours. Mais, dans de nombreux cas où il n'existe pas d'études de référence à long terme, on n'a pas d'autre choix que d'« extrapoler » jusqu'à cette échéance les mesures effectuées à plus court terme.

Cette pratique est admise par les textes en vigueur. En effet, les normes relatives aux assises de chaussées [2 à 5] proposent, selon la phase liante utilisée, des coefficients de correspondance pour calculer les performances à long terme à partir des mesures faites à des âges de cure de 28, 60 ou 90 jours. Mais ces coefficients ne distinguent pas la nature des granulats qui entrent dans les mélanges, alors que ceux-ci jouent très probablement un rôle non négligeable. Ces documents précisent d'ailleurs que les coefficients ne sont donnés qu'à titre indicatif, et qu'ils « peuvent varier en fonction de la nature pétrographique des matériaux et de la nature des liants hydrauliques utilisés », sans proposer toutefois de précision supplémentaire.

Les résultats présentés apportent certaines réponses, du moins pour la résistance à la traction de trois types de produits :

- les graves traitées aux liants routiers (GTLR),
- les sables traités aux liants routiers (STLR),
- les graves-ciment (GC).

Une synthèse des affinités granulats-liants est proposée également. L'étude confirme parallèlement

la pertinence du coefficient d'équivalence entre traction directe et fendage.

Signalons enfin que les caractéristiques des formules présentées ne peuvent être fournies, pour des raisons évidentes de confidentialité. Elles se situent toutefois dans les fourchettes G1-G3 pour les graves, et S1-S4 pour les sables, performances habituelles pour ce type de techniques. De même, les liants testés ne représentent pas tous des produits utilisés par la société SCREG EST.

Résistance à la traction et coefficient de correspondance

Les données utilisées dans ces travaux sont les valeurs d'essais de traction (encart 1) réalisés sur éprouvettes par méthode directe (diabolo 16/32, norme NF P 98-232-1) ou par fendage (éprouvettes cylindriques de plusieurs dimensions d'élancement 2, norme NF P 18-408).

On dispose actuellement de cinq documents officiels concernant la caractérisation mécanique des MTLH. Ils peuvent être regroupés en trois catégories :

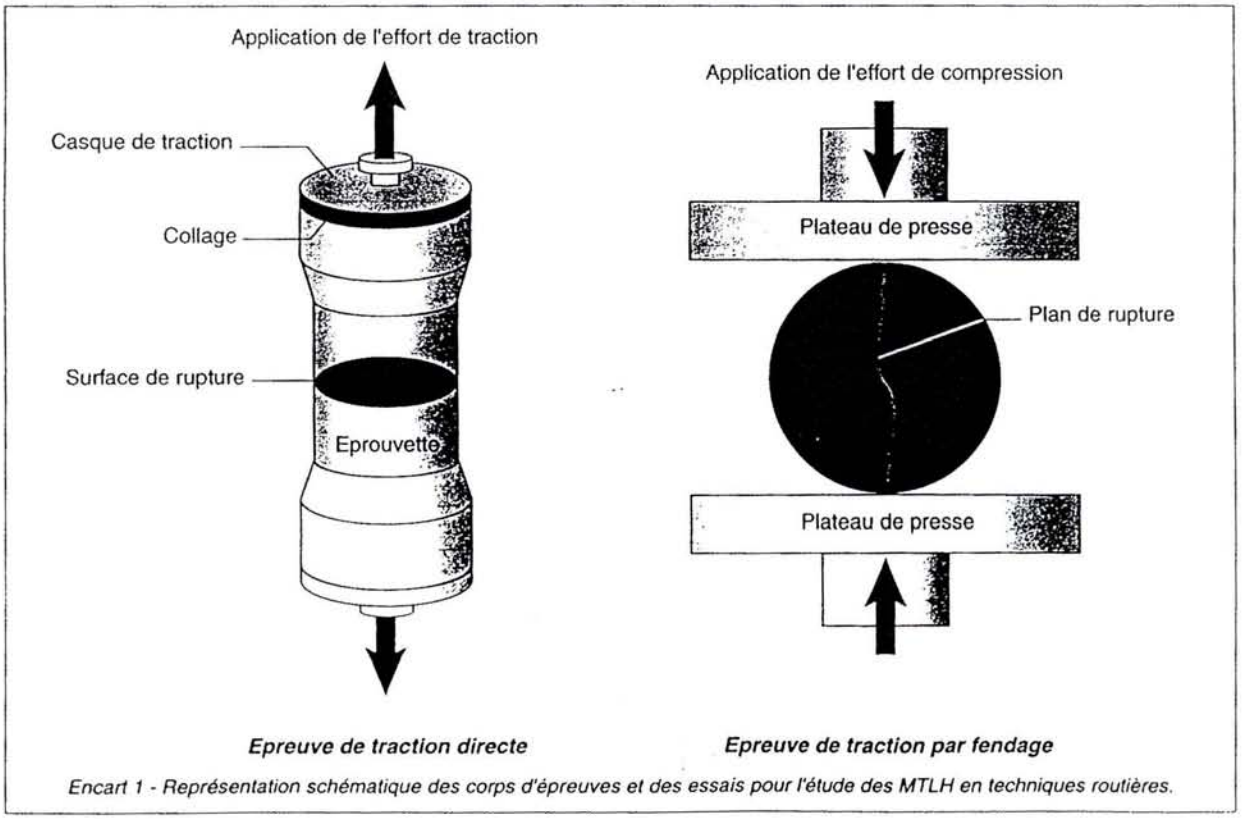
➢ les normes méthodologiques concernant les graves traitées aux liants hydrauliques NF P 98-114-1 [2] et les sables traités aux liants hydrauliques NF P 98-114-2 [3],

➢ les normes « produits » relatives à ces mélanges NF P 98-116 [4] et NF P 98-113 [5],

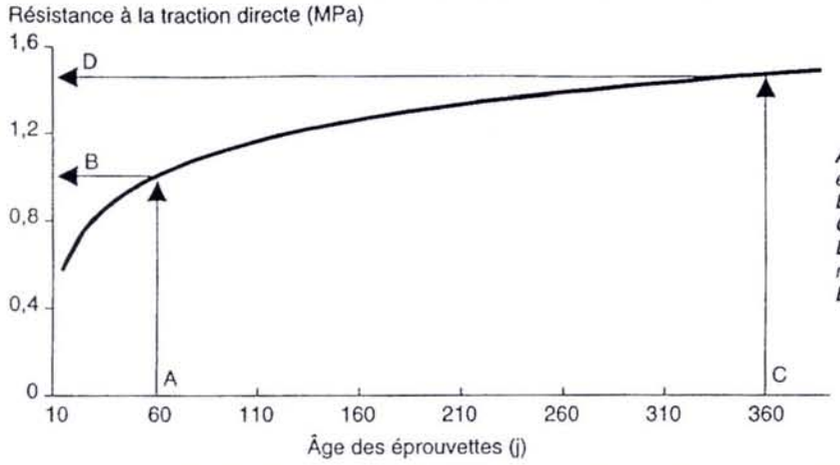
➢ un guide d'application des normes précédentes (SETRA/LCPC) [6].

Ces différents documents définissent la façon de concevoir une étude de MTLH à partir des performances mécaniques des mélanges durcis. Notons que la classification des MTLH est basée sur le couple (Rt, E), ces deux paramètres étant respectivement la résistance à la traction directe et le module d'élasticité mesurés à 360 jours. Comme le montre l'encart 2, la résistance à la traction peut être extrapolée à partir d'une valeur mesurée à court terme (60 jours, par exemple). Il en est de même pour le module. Le tableau I, extrait du guide d'application, rappelle pour ces deux paramètres et pour les principales techniques, selon les liants utilisés, l'âge des essais et les coefficients de correspondance à 360 jours.

Faute d'essais réalisés à 360 jours, les normes « produits » recommandent d'utiliser ces coefficients en l'absence d'autres indications pouvant figurer dans les normes méthodologiques, et vice versa. Mais ces documents n'avancent aucune valeur spécifique... Le guide d'application signale, quant à lui, que les coefficients peuvent changer selon la nature pétrographie des granulats et du liant, en précisant que ce sont alors les coefficients proposés par les avis techniques (AT) des



Encart 1 - Représentation schématique des corps d'épreuves et des essais pour l'étude des MTLH en techniques routières.



A : âge j où une performance peut être extrapolée.
B : résistance Rt_j mesurée au jour j.
C : âge de référence (360 j).
D : résistance atteinte à l'âge de référence (Rt_{360}).
B/D : coefficient de correspondance.

Encart 2 - Cinétique de durcissement des MTLH – Notion schématique de coefficient de correspondance.

TABLEAU I

Rappel des âges et valeurs des coefficients de correspondance pour différentes techniques d'assises traitées (d'après [6])

Technique	Liant	Age (j)	Rt_j/Rt_{360}	E_j/E_{360}
Graves	Ciment	28	0,60	0,65
	Liant spécial routier	60	0,65	0,70
	Cendres hydrauliques	60	0,60	0,65
	Pouzzolane–chaux	90	0,50	0,50
	Laitier	90	0,70	0,70
	Laitier-cendres volantes-chaux	90	0,60	0,65
	Cendres volantes-chaux	90	0,65	0,75
Cendres volantes	Chaux-gypse	90	0,85	0,89
BC et GTLH HP	Ciment	28	0,60	0,65
	Liants spéciaux	60	0,65	0,70
	Cendres hydrauliques	60	0,60	0,65
	Laitiers activés	90	0,70	0,70
	Cendres volantes-chaux	90	0,65	0,75
	Mélange	90	0,70	0,75
Sables	Ciment	28	0,60	0,65
	Liants spéciaux	60	0,65	0,70
	Cendres hydrauliques	60	0,60	0,65
	Laitiers activés	90	0,70	0,75
	Pouzzolanes-chaux	90	0,50	0,50
	Cendres volantes-chaux	90	0,65	0,75
	Mélanges	90	0,70	0,75

liants qui, le cas échéant, doivent être utilisés. Á notre connaissance, pour les liants routiers disponibles dans l'Est de la France, ces données ne sont proposées que pour l'Arc 3 et le PRV-A. Les valeurs sont les suivantes :

Arc 3 (AT n° 46 07/91)

$$\frac{Rt_{28}}{Rt_{360}} = 0{,}65 \text{ et } \frac{E_{28}}{E_{360}} = 0{,}70$$

PRV-A (AT n° 78 02/94) (1)

$$\frac{Rt_{28}}{Rt_{360}} = 0{,}60 \text{ et } \frac{E_{28}}{E_{360}} = 0{,}80$$

On remarquera que les valeurs pour l'Arc 3 sont les mêmes que celles du guide d'application (liants spéciaux), mais l'âge de correspondance est de 28 jours à la place de 60 jours. La cinétique de prise et de durcissement des MTLH à base de ce liant routier serait donc plus rapide. Avec le PRV-A, c'est le module de rigidité qui serait accéléré.

Concernant les présents travaux, de trois à dix essais de traction ont été pratiqués entre 10 et 360 jours pour chaque formule étudiée (les valeurs de module ne sont pas exploitées ici). Un essai est constitué d'au moins trois mesures. Ces données permettent de suivre la cinétique de prise et de durcissement des mélanges (encart 2). Pour chaque formule, l'ensemble des points expérimentaux a été lissé par une fonction de type :

$$Rt_j = a + b \,.\, \log(j) \qquad (2)$$

où a et b sont les coefficients ajustés à la plus faible incertitude. Ce genre d'approximation semi-logarithmique est proposé, par exemple, par Dreux [6] ou de Larrard [7] pour les bétons. Cette approche n'a toutefois pas toujours donné satisfaction. Dans ce cas, un lissage manuel ou automatique avec diverses fonctions (TableCurve2D.V4 ®) a été préféré. Ces traitements ont permis, d'une part, d'écarter les distributions manifestement aberrantes et, d'autre part, de calculer les valeurs de Rt_j et Rt_{360} d'où sont tirés les coefficients de correspondance présentés plus loin.

Matériaux et mélanges

La société SCREG EST est amenée à utiliser les matériaux d'un certain nombre de gisements situés dans le quart nord-est de la France (fig. 1). Ceux d'où proviennent les granulats de l'étude sont répertoriés dans le tableau II, par type de gisement et par nature pétrographique.

Pour une nature de granulat, le choix du type de liant est guidé par divers facteurs qui sont généralement :

➢ l'obtention de la qualité requise : les meilleures affinités sont repérées lors d'études de valorisation des matériaux destinés à entrer dans le catalogue « produits » de la société. De telles études peuvent également être réalisées pour un marché spécifique ;

Fig. 1 - Zones de production des granulats de l'étude.

➢ la recherche du meilleur coût : pour une enveloppe budgétaire déterminée, le choix du liant est alors guidé par le rapport prix/performances ;

➢ la disponibilité dans le secteur du chantier : les liants hydrauliques routiers spéciaux ne sont généralement disponibles que dans une région donnée.

Le dosage en liant est ajusté pour tenir compte des contraintes économiques et techniques (performances, risque d'hétérogénéités liés à un sous-dosage en liant, risque de fissurations causées par excès de liant, etc.). Le tableau III présente les liants utilisés, avec leurs principaux constituants tels qu'ils sont décrits dans les fiches « produits » et avis techniques du CFTR. Notons que certains de ces produits ne sont désormais plus commercialisés.

L'inventaire des mélanges, présenté par techniques d'assises, est donné dans le tableau IV. Ces 156 formules présentent un aperçu des produits couramment fabriqués par SCREG EST. Les mélanges à base de liants routiers (liants spéciaux) sont les plus fréquents. Ceux contenant du ciment ne sont fabriqués souvent qu'à titre de référence.

Les résultats détaillés pour ces trois techniques sont présentés plus loin. Pour chacune d'elles, l'étude porte sur l'influence de la nature des granulats, du dosage en liant et de sa nature. Ils sont suivis d'une synthèse. La relation entre essai de traction directe et essai de fendage est abordée ci-après.

TABLEAU II
Inventaire et nature des sites de production des granulats

Gisement	Nature	Site
Roche massive	Calcaire	Beaufremont
		Attignéville
		Viterne
		Jaillon
		Montois-la-Montagne
		Angy
		Épagny
		Voulaines-les-templiers
		Darcey
		Bannost
	Calcaire dolomitique	Wallers-Trelon
Alluvions	Calcaire	Courlandon
		Mezy
		Aigny
		Cheppes-la-Prairie
		Ablancourt
		Plichancourt
		Matignicourt
		Saint-Éloi (Romilly-sur-Seine)
		Longvic
	Siliceux	Sainte-Marguerite
		La-Chapelle-devant-Bruyères
Sablon	Siliceux	Muizon
		Fossoy

TABLEAU III
Inventaire et constituants des liants hydrauliques utilisés

Constituants	Liants spéciaux routiers												
	Ligex2R	Fpl 1	Roc	Roc AS	Arc GS	Arc 4	Arc 3	Arc 2	Arc 1	LR 39	Prv A	CLK	CLC
Laitier HF	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x
Chaux vive	x		x				x		x		x		
Gypse	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x
Clinker		x		x						x		x	x
Kalsin										x			
Cendres volantes											x		x
Autres constituants												x	

TABLEAU IV
Inventaire des formules utilisées dans l'étude

	GTLR	STLR	GC	Total
Nombre de formules	89	54	13	156

Relation traction directe/fendage

L'un des premiers résultats obtenus sur ces matériaux est la confirmation de la relation proposée par les normes « produits » [4, 5] entre la contrainte Rt_j mesurée en traction directe (NF P 98-232-1) et la contrainte de traction ft_j mesurée en fendage (NF P 18-408) :

$$Rt_j = 0{,}8\ ft_j \qquad (3)$$

En effet, la comparaison des résultats de ces deux types d'essais pratiqués systématiquement sur trente-six formules de GTLH et de STLH donne, pour ce rapport, une valeur de 0,79, avec un écart-type de 0,18 (fig. 2). Les éprouvettes cylindriques qui ont servi à ces essais sont, pour la traction directe, des « diabolos » 16/32 et, pour le fendage, des cylindres 10/20. Les essais ont été pratiqués à 28 ou 60 jours d'âge. Le coefficient trouvé est bien celui proposé par la norme, avec toutefois une dispersion non négligeable. Notons qu'il n'a pas été utilisé dans la suite de l'étude : tous les coefficients de correspondance sont déduits de comparaisons entre valeurs de fendage ou valeurs de traction directe.

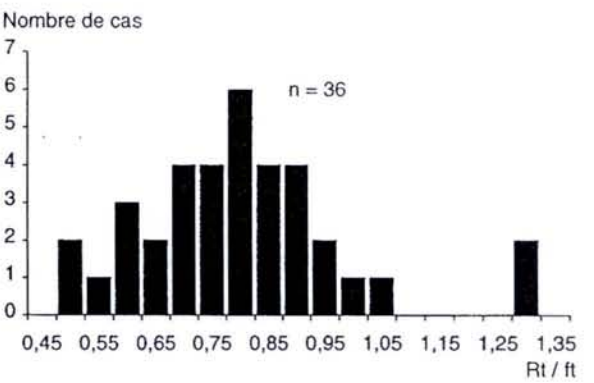


Fig. 2 - Distribution des coefficients Rt/ft mesurées au laboratoire.

Vérification des coefficients de correspondance à âges différents

Cas des graves traitées aux liants routiers (GTLR)

Le tableau V reprend toutes les formules de graves traitées aux liants routiers (GTLR) jugées représentatives avec, pour chacune d'elles, l'ori-

TABLEAU V

Résultats d'ensemble relatifs aux graves traitées aux liants routiers (GTLR)

Formulation					Formulation				
Granulats		Liant		Rt_{60}/Rt_{360}	Granulats		Liant		Rt_{60}/Rt_{360}
Sable	Gravillon	Nature	Dosage		Sable	Gravillon	Nature	Dosage	
Ablancourt	Ablancourt	Roc AS	3,5	0,77			Arc GS	4	0,89
Aigny	Aigny	Roc AS	3,5	0,82			Ligex 2R	3	0,74
		Fpl 1	3,5	0,61			Ligex 2R	4	0,70
		Ligex 2R	3,5	0,61			Prv A	3	0,67
Attigneville	Attigneville	Arc GS	6	0,87	Plichancourt	Plichancourt	Prv A	4	0,68
Beine-Plichancourt	Plichancourt	Ligex 2R	4,5	0,71			Arc GS	3,5	0,79
		Ligex 2R	3,5	0,76			Ligex 2R	3,5	0,70
		Ligex 2R	4,5	0,67			Prv A	3,5	0,67
		Ligex 2R	3,5	0,64			Arc GS	3	0,86
Cheppes	Cheppes	Roc AS	3,5	0,75			Arc GS	3	0,66
		Ligex 2R	3,5	0,59	Saint-Éloi	Saint-Éloi	Arc GS	3	0,59
Courlandon-la-Chaussée	Coulandon	Arc GS	3,5	0,58			Roc AS	3,5	0,74
Courlandon-Muizon	Coulandon	Roc AS	5	0,59	Saint-Éloi	Saint-Éloi	RocCraie	3,5	0,62
		Roc AS	8	0,64			Roc AS	3,5	0,80
		Roc AS	5	0,70			Roc AS	3,5	0,84
Courlandon-Muizon	Coulandon	Arc GS	5	0,53			Roc AS	3,5	0,83
		Arc GS	7	0,66	Saint-Éloi	Saint-Éloi	Roc AS	3,5	0,76
		Arc GS	4	0,65			Roc	3,5	0,64
Épagny	Épagny	Arc 3	4	0,76			Roc AS	3,5	0,63
Longvic	Longvic	LR 39	3,5	0,70			Roc AS	4	0,79
Matignicourt	Matignicourt	Roc AS	3,5	0,87	Saint-Éloi	Saint-Éloi + Bannost	Ligex 2R	3,5	0,85
Mezy	Mezy	Roc AS	3,7	0,80			Roc AS	3,5	0,85
		Roc AS	3,5	0,73			Arc GS	4,5	0,90
Montois-la-Montagne	Montois-la-Montagne	CLK 45	3,5	0,83	Viterne	Viterne	Arc GS	3,5	0,84
		Ligex 2R	3,5	0,78			Arc GS	3,5	0,75
		Arc GS	3,5	0,65			Prv A	4	0,62
		Arc 3	3,5	0,74			Prv A	3	0,53
		Roc AS	3,5	0,70			Arc 4	4	0,86
		Ligex 2R	4,5	0,73			Arc 4	3	0,77
		Arc GS	4,5	0,74			Arc GS	4	0,79
		Arc 3	4,5	0,67			Arc GS	3	0,86
		Roc AS	4,5	0,83			Prv A	4	0,74
		Arc GS	5,5	0,83			Prv A	3	0,67
		Ligex 2R	5,5	0,89			Arc 4	4	0,91
		Ligex 2R	3,5	0,87	Viterne	Viterne	Arc 4	3	0,73
Plichancourt	Plichancourt	Roc AS	3,5	0,71			Arc GS	4	0,63
		Roc AS	3,5	0,57			Arc GS	3	0,79
		Roc AS	3,5	0,49			Arc 4	4	0,82
		Roc AS	3,5	0,68			Arc 4	3	0,67
Plichancourt	Plichancourt	Arc GS	3,5	0,76			Prv A	4	0,71
		Ligex 2R	3,5	0,77			Prv A	3	0,69
Plichancourt	Plichancourt	Arc GS	7	0,89			Arc GS	4	0,87
		Arc GS	6	0,71			Arc GS	3	0,62
		Arc GS	5	0,91			Arc GS	3,5	0,80
					Voulaines	Voulaines	LR 39	3,5	0,87

gine des granulats, leur nature, le dosage en liant et le coefficient de correspondance entre traction directe à 60 jours et 360 jours (Rt_{60}/Rt_{360}). La figure 3 présente la distribution statistique globale de ce coefficient. Le nombre total de mesures est de 911. La valeur moyenne du coefficient est de 0,74 (écart-type de 0,10), sa valeur minimale de 0,49 et sa valeur maximale de 0,91. On remarquera que cette moyenne est supérieure d'un écart-type à la valeur de 0,65 préconisée par le guide d'application (*cf.* tableau I, cas des graves traitées aux liants spéciaux routiers). Le coefficient normatif pêche donc par optimisme d'environ 15 % s'il est appliqué sous cette forme et sans tenir compte des constituants du mélange.

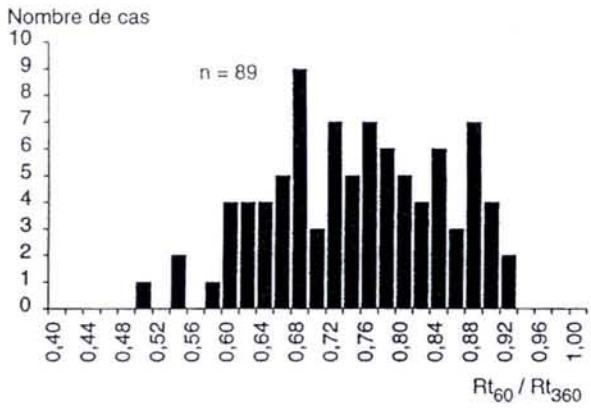


Fig. 3 - Distribution des coefficients de correspondances pour les graves traitées aux liants routiers (GTLR). Analyse globale.

Un traitement sélectif révèle des nuances intéressantes. En effet, comme le montre le tableau VI, si l'on regroupe les résultats par nature de granulat (calcaire ou siliceux) et par type de gisement (massif ou alluvions), on obtient des coefficients de correspondance nettement distincts. De même, la nature du liant hydraulique routier a une influence non négligeable. Le tableau VII montre cet aspect pour les liants dont il existait un nombre suffisant de mesures avec, toujours, une dissociation selon la nature du granulat et le type de gisement. On remarquera que la valeur moyenne pour Arc 3 (0,72) dépasse bien le seuil de la norme (0,65), comme l'annonce la fiche technique du produit, sans pouvoir toutefois se prononcer sur l'âge auquel la valeur normative est vérifiée. Pour PRV-A, le coefficient moyen est de 0,66, valeur satisfaisante au regard de la norme et de l'avis technique (0,60 à 28 jours). Enfin, le dosage en liant n'a pas de rôle réellement significatif, comme on peut le voir sur la figure 4 où aucune corrélation franche n'apparaît (un point représente une formulation statistiquement représentative).

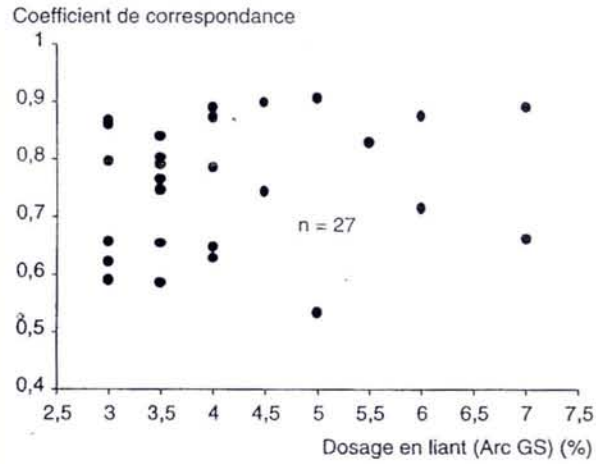


Fig. 4 - Influence du dosage en liant (Arc GS) sur le coefficient de correspondance. Cas des graves traitées aux liants routiers (GTLR).

Cas des sables traités aux liants routiers (STLR)

La présentation des données est identique à la précédente (cas des GTLR). Le tableau VIII reprend l'ensemble des valeurs jugées fiables et la figure 5 donne la distribution du coefficient de correspondance. Le nombre total de mesures est de 545. La valeur moyenne du coefficient est de 0,69 (écart-type de 0,10), sa valeur minimale de 0,53 et sa

TABLEAU VI
Influence de la nature des granulats et du type de gisement sur le coefficient de correspondance Rt_{60}/Rt_{360}. Cas des graves traitées aux liants routiers (GTLR)

Nature des granulats	Nature du gisement	Nombre de mesures	Coefficient de correspondance Rt_{60}/Rt_{360}			
			Moyenne	Minimum	Maximum	Écart-type
	Non distingué	669	0,74	0,49	0,91	0,10
Calcaire	Roche massive	312	0,77	0,53	0,91	0,09
	Alluvionnaire	327	0,71	0,49	0,89	0,09
Siliceux + Calcaire	Sablon + Alluvion.	69	0,63	0,53	0,70	0,05

TABLEAU VII

Influence de la nature des liants routiers sur le coefficient de correspondance Rt_{60}/Rt_{360}. Cas des graves traitées aux liants routiers (GTLR)

Liant routier	Nature des granulats	Nature du gisement	Nombre de mesures	Coefficient de correspondance Rt_{60}/Rt_{360}			
				Moyenne	Minimum	Maximum	Écart-type
Ligex 2 R	Non distingué	Non distingué	167	0,73	0,59	0,89	0,09
	Calcaire		108	0,76	0,59	0,89	0,09
		Roche massive	39	0,82	0,73	0,89	0,07
		Alluvionnaire	54	0,70	0,59	0,77	0,06
Roc AS	Non distingué	Non distingué	242	0,74	0,49	0,87	0,10
	Calcaire		173	0,73	0,49	0,85	0,10
		Roche massive	21	0,77	0,70	0,83	0,06
		Alluvionnaire	137	0,71	0,49	0,84	0,11
Arc GS	Non distingué	Non distingué	259	0,76	0,53	0,91	0,11
	Calcaire		196	0,77	0,58	0,90	0,10
		Roche massive	114	0,78	0,62	0,90	0,09
		Alluvionnaire	82	0,73	0,58	0,89	0,12
Arc 3	Calcaire	Roche massive	33	0,72	0,67	0,76	0,04
Arc 4	Calcaire	Roche massive	48	0,79	0,67	0,91	0,08
Prv A	Non distingué	Non distingué	75	0,66	0,53	0,74	0,06
	Calcaire		75	0,66	0,53	0,74	0,06
		Roche massive	48	0,66	0,53	0,74	0,07
		Alluvionnaire	27	0,67	0,67	0,68	0,004

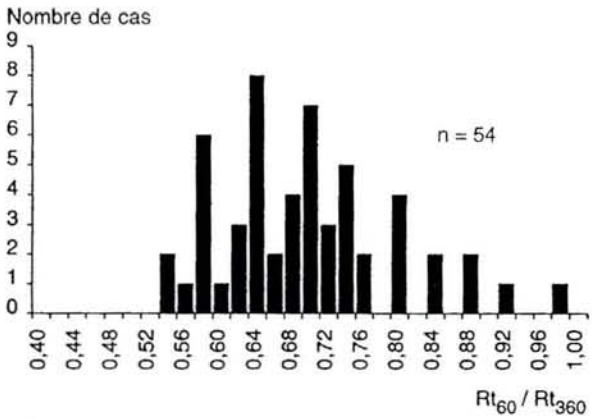


Fig. 5 - Distribution des coefficients de correspondances pour les sables traités aux liants routiers (STLR). Analyse globale.

valeur maximale de 0,96. Comme pour les graves traitées, la valeur moyenne du coefficient est supérieure (de 6 %) à la valeur de 0,65 préconisé par la guide d'application (*cf.* tableau I, cas des sables traités au liant spécial routier). On notera que la dispersion tend à être plus importante pour les valeurs supérieures à la moyenne.

Les tableaux IX et X et la figure 6 correspondent aux analyses par catégories. Le tableau IX montre, comme précédemment, des différences selon la nature des granulats (calcaire ou siliceux) et le type de gisement (roche massive ou alluvionnaire). Le tableau X montre le rôle de la nature des liants. La figure 6 confirme l'absence d'influence du dosage en liant sur le coefficient de correspondance.

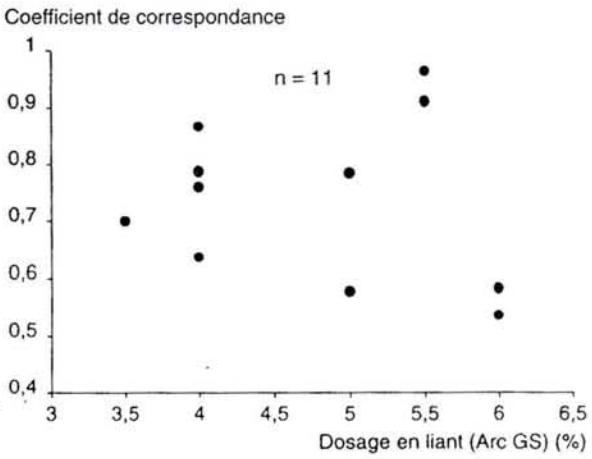


Fig. 6 - Influence du dosage en liant (Arc GS) sur le coefficient de correspondance. Cas des sables traités aux liants routiers (STLR).

TABLEAU VIII

Résultats d'ensemble relatifs aux sables traités aux liants routiers (STLR)

Formulation				Formulation			
Granulats	Liant		Rt_{60}/Rt_{360}	Granulats	Liant		Rt_{60}/Rt_{360}
Sable	Nature	Dosage		Sable	Nature	Dosage	
Viterne	Arc GS	5,5	0,96	Montois-la-Montagne	Ligex 2R	4	0,67
	Arc GS	5,5	0,91		Arc 3	4	0,66
	Roc	4,5	0,69		Roc AS	4	0,63
	Arc 3	4,5	0,66		Arc GS	6	0,53
	Arc GS	5	0,58	Courlandon-Muizon	Arc GS	4	0,76
	Arc GS	4	0,79		Arc GS	6	0,58
Jaillon	Ligex 2R	5	0,79		Roc	6	0,73
	Ligex 2R	4	0,83	Montois-la-Montagne	LigexX	6	0,83
	Prv A	5	0,69		CLK	6	0,63
	Prv A	4	0,67		Arc 3	6	0,56
	Arc 1	5	0,88		Roc AS	6	0,63
	Arc 1	4	0,79	Fossoy-Mezy	Roc AS	6	0,61
	Arc GS	5	0,78	Chapelle-dvt-Bruyeres	Arc 3	4	0,58
	Arc GS	4	0,86		Arc 3	6	0,64
	Roc	5	0,71	Saint-Erme-Wallers-Trelon	Roc	6	0,60
	Roc	4	0,76		Roc	8	0,73
Viterne	Arc 3	3,5	0,68		Roc	4	0,57
	Arc 3	4,5	0,70		Roc	5	0,64
	CLK 45	3,5	0,73		Roc	6	0,67
	CLK 45	4,5	0,70		Roc	4	0,54
	Prv A	3,5	0,57		Roc	5	0,56
	Prv A	4,5	0,68		Ligex	6	0,72
	Roc	3,5	0,62		Roc AS	6	0,73
	Roc	4,5	0,62	Cloyes	Arc GS	4	0,63
	Arc 1	3,5	0,69		Arc GS	3,5	0,70
	Arc 1	4,5	0,63	Courlandon-Muizon	Roc	6	0,56
	Arc 2	3,5	0,69		Roc AS	6	0,71

TABLEAU IX

Influence de la nature des granulats et du type de gisement sur le coefficient de correspondance Rt_{60}/Rt_{360}. Cas des sables traités aux liants routiers (STLR)

Nature de granulats	Nature du gisement	Nombre de mesures	Coefficient de correspondance			
			Moyenne	Minimum	Maximum	Écart-type
Calcaire	Non distingué	371	0,71	0,53	0,96	0,10
	Roche massive	347	0,71	0,53	0,96	0,10
	Alluvionnaire	24	0,67	0,63	0,70	0,03
Silice + Calcaire	Sablon + Alluvionnaire	120	0,64	0,54	0,73	0,07
Siliceux	Alluvionnaire	18	0,61	0,58	0,64	0,03

TABLEAU X
Influence de la nature des liants routiers sur le coefficient de correspondance Rt_{60}/Rt_{360}. Cas des sables traités aux liants routiers (STLR)

Liant routier	Nature des granulats	Nature du gisement	Nombre de mesures	Coefficient de correspondance			
				Moyenne	Minimum	Maximum	Écart-type
Ligex 2 R	Calcaire	Roche massive	41	0,76	0,67	0,83	0,07
Roc	Non distingué	Non distingué	152	0,64	0,54	0,76	0,07
	Calcaire	Roche massive	53	0,68	0,62	0,76	0,05
	Silice + Calcaire	Mélange All / RM	84	0,61	0,54	0,73	0,06
Arc GS	Calcaire	Non distingué	88	0,75	0,53	0,96	0,14
		Roche massive	64	0,77	0,53	0,96	0,15
		Alluvionnaire	24	0,67	0,63	0,70	0,03
Arc 3	Non distingué	Non distingué	56	0,64	0.56	0,70	0,05
	Calcaire	Roche massive	38	0,65	0,56	0,70	0,05
	Siliceux	Alluvionnaire	18	0,61	0,58	0,64	0,03
Prv A	Calcaire	Roche massive	48	0,65	0,57	0,69	0,05

Cas des graves-ciment (GC)

Cette étude s'intéresse aussi au cas des graves traitées aux ciments normalisés, mêmes si ces techniques sont désormais moins utilisées. Le tableau XI donne l'ensemble des coefficients pour les différentes natures de granulats et de ciments. L'exploitation statistique est présentée sur la figure 7. La valeur moyenne du coefficient est de 0,72 (99 mesures, 13 formules). Sa valeur minimale est de 0,41, sa valeur maximale de 0,96 et l'écart-type (utilisé ici comme paramètre estimatif) est de 0,16. Seules les influences de la nature du granulat et du mode de gisement sont étudiées (tableau XII).

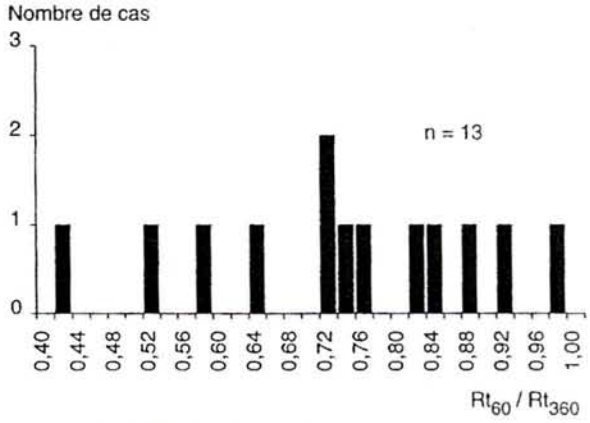


Fig. 7 - Distribution des coefficients de correspondances pour les graves-ciment. Analyse globale.

TABLEAU XI
Résultats d'ensemble relatifs aux graves-ciment (GC)

Formulation					Formulation				
Granulats		Liant		Rt_{28}	Granulats		Liant		Rt_{28}
Sable	Gravillon	Nature	Dosage	Rt_{360}	Sable	Gravillon	Nature	Dosage	Rt_{360}
Viterne	Viterne	CLK 45	3,5	0,71	Voulaines	Voulaines	CPJ 45	3,5	0,82
		CLK 45	3,5	0,71	Voulaines	Voulaines	CPJ 45	3,5	0,82
		CLK 45	3,5	0,74	Ste-Margueritte	Ste-Margueritte	CLC	3,5	0,50
		CLK 45	3,5	0,96			CLC	3,5	0,62
		CLK 45	3,5	0,58	Matignicourt	Matignicourt	CLK 45	3,5	0,75
		CLK 45	3,5	0,92	Plichancourt	Plichancourt	CLK 45	3,5	0,71
		CLK 45	3,5	0,41			CLK 45	3,5	0,87

TABLEAU XII
Influence de la nature des granulats et du type de gisement.
Cas des graves-ciment (GC)

Nature de granulats	Nature du gisement	Nombre de mesures	Coefficient de correspondance Rt_{28}/Rt_{360}			
			Moyenne	Minimum	Maximum	Écart-type
Calcaire	Non distinguée	81	0,75	0,41	0,96	0,16
	Roche massive	45	0,73	0,41	0,96	0,18
	Alluvionnaire	36	0,78	0,71	0,87	0,07
Siliceux	Alluvionnaire	18	0,56	0,50	0,62	0,06

Synthèse des résultats - Bilan

Le tableau XIII rappelle le coefficient de correspondance du guide d'application des normes pour chaque technique étudiée et fait apparaître ceux obtenus dans le cadre de cette étude selon les différentes natures de granulats, le type de gisement et les liants utilisés (l'écart-type est donné entre parenthèses). La figure 8 montre l'évolution de ce coefficient en fonction des différentes natures de granulats, tous liants confondus.

Ce bilan montre très clairement que le coefficient de correspondance en traction dépend non seulement de la nature du liant, mais aussi et de la nature et, dans une moindre mesure, du type de gisement des granulats. Dans le détail, on observe que les coefficients trouvés sont :

- globalement ceux du guide d'application pour les matériaux alluvionnaires de nature siliceuse ;
- systématiquement supérieurs pour les calcaires.

TABLEAU XIII
Bilan général des coefficients de correspondance

		Graves traitées aux liants routiers (GTLR)				Sables traités aux liants routiers (STLR)					Graves traitées au ciment (GC)			
Guide d'application		0,65 (60 j)				0,65 (60 j)					0,60 (28 j)			
Étude		**0,74** (0,10)*				**0,69** (0,10)					**0,72** (0,16)			
Gisement		Massif		Alluvions		Massif		Alluvions			Massif		Alluvions	
Granulats		Calcaire		Calcaire	Siliceux** + Calcaire	Calcaire	Siliceux* + Calcaire	Calcaire	Siliceux* + Calcaire	Siliceux	Calcaire		Calcaire	Siliceux
Liants	Ligex 2R	**0,82** (0,07)		**0,70** (0,06)		**0,76** (0,07)								
	Roc As	**0,77** (0,06)		**0,71** (0,11)		**0,68** (0,05)								
	Arc GS	**0,78** (0,09)		**0,73** (0,12)		**0,65** (0,05)		**0,67** (0,03)						
	Arc 3	**0,72** (0,04)								**0,61** (0,03)				
	Arc 4	**0,79** (0,08)												
	Prv A	**0,66** (0,07)		**0,67** (0,04)		**0,65** (0,05)								
	CLK										**0,73** (0,18)		**0,78** (0,07)	**0,56** (0,06)
	Tous liants confondus	**0,77** (0,09)		**0,71** (0,09)	**0,63** (0,05)	**0,71** (0,10)		**0,67** (0,03)	**0,64** (0,07)	**0,61** (0,03)				

* Les valeurs entre parenthèse sont les écarts-types sur les coefficients.
** Ces granulats sont issus de sablons.

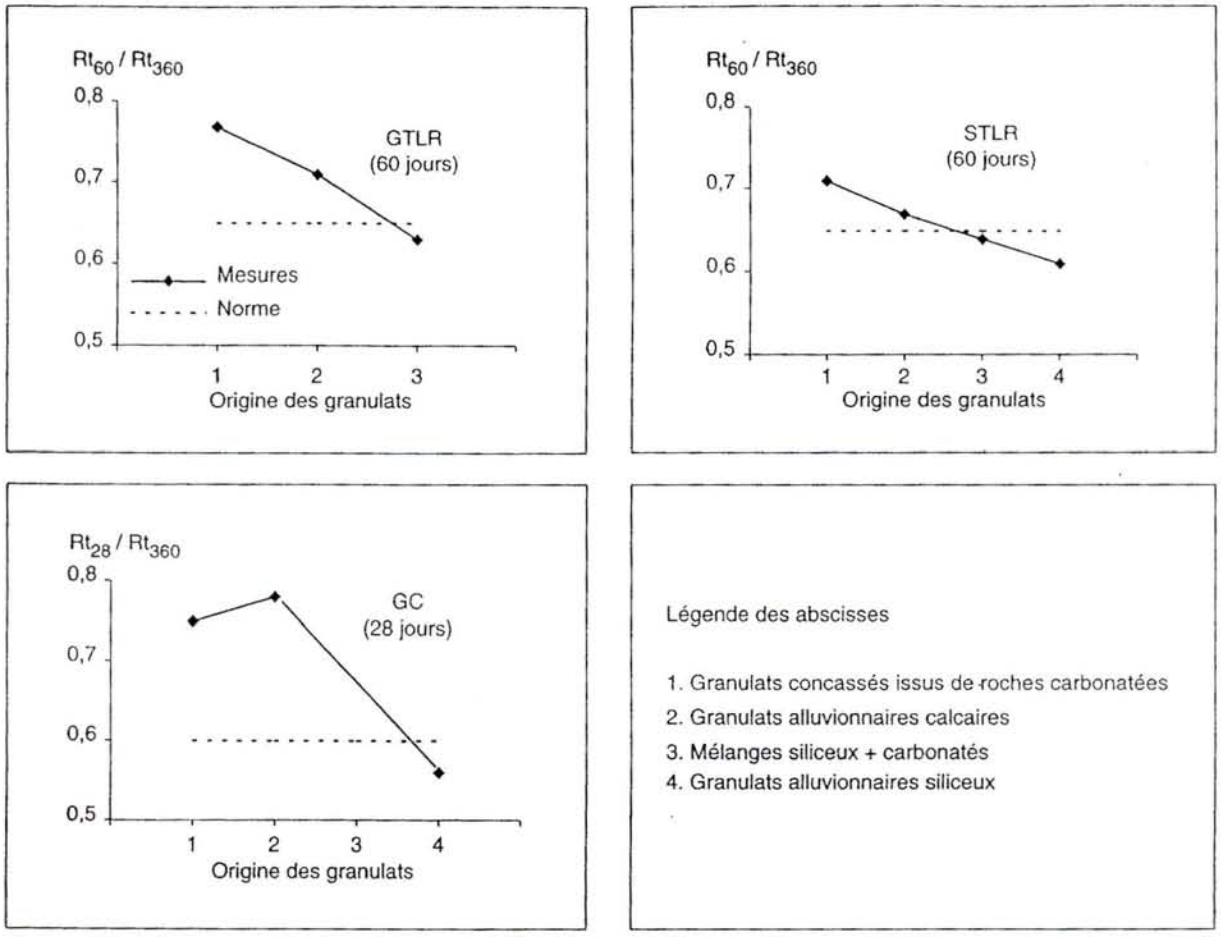


Fig. 8 - Évolution du coefficient de correspondance selon la nature des granulats pour les différentes techniques de chaussées étudiées.

En d'autres termes, les mélanges à base de granulats calcaires concassés (roches massives) atteignent, à 28 ou 60 jours selon les liants, environ 75 % de leur résistance à long terme, alors que le guide donne des valeurs de 60 ou 65 %.

Pour les matériaux calcaires d'origine alluvionnaire, la différence est moindre, excepté pour les (graves) ciments où le coefficient avoisine 0,80. On constate donc que les matériaux carbonatés ont un *effet accélérateur* indéniable sur la cinétique de prise et de durcissement des mélanges hydrauliques étudiés.

L'objet de cet article n'est pas de rechercher l'origine physico-chimique du phénomène, sachant toutefois que de nombreux travaux scientifiques ont déjà apporté une contribution en ce sens [9, 10]. On peut cependant rappeler [8] que ce seraient *les fines calcaires* qui agissent comme des sites de nucléation, augmentant ainsi la probabilité de précipitation des hydrates dissous et accélérant l'hydratation. Ensuite, dans une certaine mesure, la portlandite dégagée lors de l'hydratation du liant se combine aux phases aluminates et aux carbonates dissous pour former des carboaluminates responsables d'un certain *effet liant* [9]. Les présents résultats apparaissent conformes à ces théories, car les calcaires concassés (roches massives) contiennent plus de fines (effet accélérateur) que ceux d'origine alluvionnaire. De même, on sait que les liants routiers d'aujourd'hui contiennent pour la plupart une importante fraction de laitier (*cf.* tableau III). Ces liants riches en alumine sont donc d'autant mieux adaptés aux mélanges calcaires (effet liant).

Ce sont aussi les liants de type CLK (riches en alumine apportée par le laitier et le clinker) qui permettent aux graves-ciment calcaires de monter plus rapidement en résistance.

Ces résultats montrent donc que les assises réalisées avec des mélanges *calcaires* traités aux liants hydrauliques routiers modernes ne doivent plus être évaluées avec le coefficient de correspondance en traction avancé par la guide d'application. En effet, si l'on extrapole avec ce coefficient la résistance mesurée à 28 ou 60 jours, les performances prévues à 360 jours risquent de ne pas être atteintes (ce qui peut constituer un problème pour les mélanges en « limite de classe »). Les coefficients proposés en remplacement sont ceux du tableau XIII. Il serait souhaitable qu'ils soient véri-

fiés et complétés par d'autres banques de données d'entreprises ou de laboratoires de recherches.

On notera, en revanche, le gain de temps que l'on peut obtenir avec les matériaux calcaires pour l'entrée en service de l'ouvrage, puisque les performances sont atteintes plus rapidement.

Conclusion

Ces travaux statistiques reposent sur un très grand nombre de valeurs fiables (près de 2 000 éprouvettes représentant plus de 150 formules) mesurées dans un cadre industriel. Ils portent à la connaissance générale des résultats que d'autres techniciens routiers pourront probablement confirmer. Ils ont pour but de compléter ou de réactualiser les coefficients de correspondance du guide d'application des normes relatives aux matériaux traités aux liants hydrauliques.

Malgré la mise en garde de ce guide concernant la nature des matériaux, les techniciens utilisent jusqu'à présent, en l'absence d'autres données, les valeurs des coefficients « moyens » proposés. On trouvera ici une vingtaine de valeurs nouvelles relatives aux performances en traction, dont la plupart s'éloignent des valeurs du guide. Il s'agit notamment de celles concernant les mélanges à base de granulats calcaires pour lesquels la cinétique de prise et de durcissement est accélérée. Les coefficients réels trouvés sont supérieurs aux coefficients moyens, avec des nuances entre GTLR, STLR et GC, selon les liants utilisés. Si l'on conserve pour ce type de formulations les coefficients des normes, les performances en traction extrapolées à long terme sont donc surestimées. Dans ce cas, le module (*cf.* tableau I) est lui aussi très probablement surestimé, ce qui conduit à concevoir des matériaux durcis de fragilité peu vraisemblable.

Notons toutefois qu'un niveau plus élevé de performance est atteint à plus court terme avec ces mélanges calcaires, ce qui n'est pas dénué d'intérêt.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] VOIRIN J. (en cours), Valorisation des calcaires de la région lorraine dans les assises routières, Thèse de l'université Henri Poincaré, Nancy 1.

[2] AFNOR (1992), NF P 98-114-1, Assises de chaussées – Méthodologie d'étude en laboratoire des matériaux traités aux liants hydrauliques – Partie 1 : Graves traitées aux liants hydrauliques, décembre.

[3] AFNOR (1994), NF P 98-114-2, Assises de chaussées – Méthodologie d'étude en laboratoire des matériaux traités aux liants hydrauliques – Partie 2 : Sables traités aux liants hydrauliques, novembre.

[4] AFNOR (2000), NF P 98-116, Assises de chaussées – Graves traitées aux liants hydrauliques – Définition – Composition – Classification, février.

[5] AFNOR (1999), NF P 98-113, Assises de chaussées – Sable traités aux liants hydrauliques – Définition – Composition – Classification, mars.

[6] SETRA/LCPC (1998), Assises de chaussées – Guide d'application des normes pour le réseau routier national.

[7] DREUX G. (1970), *Guide pratique du béton*, SDTBTP.

[8] DE LARRARD F. (2000), traduit de l'anglais par A. LECOMTE, 2000. *Structures granulaires et formulation des bétons*, Études et recherches des laboratoires des Ponts et Chaussées, **OA 34,** avril, 414 pages.

[9] OLLIVIER J.-P., GRANDET J., HAKIM F. (1984), Réactions entre granulats calcaires et pâte de ciment alumineux, *Bulletin de l'AIGI*, **30.**

[10] EVRARD O, CHLOUP-BONDAND M. (1994), Réactivité chimique des calcaires en milieu basique : application aux ciments et bétons, *Annales de l'ITBTP*, **529,** décembre, série béton 317.

ABSTRACT

Forecasting the long term strength of road mixes treated with cementious binders

J. VOIRIN, D. DESMOULIN, A. LECOMTE

Over the years industrial road research laboratories have conducted a large number of studies of road mixes treated with cementitious binders. The resulting data is of great value as a means of supplementing or updating official technical documents. The present study uses data from the database in the SCREG EST laboratory in Nancy. This data consists of more than 2000 tensile strength measurements made on cementitious binder treated mixes incorporating various types of aggregate and different binders. A statistical analysis of this data allows us to reach a verdict on the usefulness of the Rt_j/Rt_{360} equivalence coefficient which is described in the standards and the relevant application guide. The validity of this coefficient has been confirmed for siliceous materials. However, it leads to an overestimation of the long term mechanical performance of mixes treated with cementitious binders that use calcareous aggregate. New values are proposed for about twenty different mixes.

PUBLICATION 2

Classification des GTLH calcaires et propriétés intrinsèques des gravillons (2004)

Classification des GTLH calcaires et propriétés intrinsèques des gravillons

Jean Voirin, Cadre Technique, Laboratoire Screg Est, Nancy
André Lecomte, Maître de Conférences HDR, Université Henri Poincaré Nancy 1
Didier Desmoulin, Directeur Technique, Société Screg Est, Nancy

Résumé

L'article présente une synthèse de plusieurs études de formulation de GTLH calcaires réalisées au laboratoire Screg Est de Nancy avec des gravillons de catégories C à F. Les résultats montrent qu'il n'y a pas de corrélation franche entre les performances des mélanges et les propriétés intrinsèques des gravillons calcaires, les classes G2 et G3 habituellement visées étant atteintes avec les différents granulats (F compris). Seule la nature du liant routier modifie la plage des performances possibles, à l'avantage des produits « spécifiques » aux calcaires. Ces résultats vont à l'encontre des prescriptions de la norme NF P 98-116, qui écarte les gravillons F jugés trop « tendres ». Elles confortent en revanche le guide d'application, qui laisse la possibilité d'utiliser des matériaux « hors norme » si l'expérience s'avère positive. Parallèlement, la résistance à la traction d'une GTLH calcaire contenant un taux croissant de liant a été comparée à la résistance à la traction de la roche mère. On montre que ce dernier paramètre peut constituer, pour les calcaires, un critère de sélection alternatif aux essais Los Angeles et Micro Deval habituels.

Introduction

Les performances mécaniques requises pour les graves traités aux liants hydrauliques ou GTLH, en termes de résistance à la traction directe Rt et de module de rigidité E, sont assez facilement atteintes avec des granulats de qualité courante. De nombreux matériaux locaux – i.e. certains calcaires « tendres » par exemple – ou recyclés peuvent être ainsi utilisés dans ces mélanges. La norme dédiée à ces produits (NF P 98-116 [1]) écarte toutefois les gravillons de catégorie F[1], sans qu'il soit fait référence à la nature minéralogique des grains. Le guide d'application des normes chaussées du SETRA/LCPC [2] précise pour sa part que « *des assouplissements peuvent être envisagés, sous réserve que les granulats aient fait l'objet de plans d'expérimentation rigoureux susceptibles d'évaluer les risques encourus avec précisions* ». Il est donc potentiellement possible de mettre en œuvre dans ces produits certains granulats de résistance mécanique *peu élevée*.

On a pu montrer par ailleurs que les *coefficients de correspondance* utilisés pour l'extrapolation à 360 jours des performances des GTLH dépendaient étroitement de la nature des grains et du liant utilisé [3]. En particulier, les calcaires présentent bien souvent des coefficients supérieurs à ceux annoncés par la norme [1], en présence des liants routiers notamment.

Cette étude complète les travaux auxquels il est fait référence précédemment [3]. Elle se propose de rapprocher les *performances mécaniques* de diverses GTLH *calcaires* des propriétés intrinsèques des gravillons utilisés. La résistance à la traction et le module

[1] Rappel : les catégories intrinsèques des gravillons sont actuellement fixées par la norme XP P 18-540, sur la base des essais Los Angeles et Micro Deval bien connus. F implique LA>45, MDE>45, LA+MDE>80

d'élasticité des mélanges sont comparés également aux valeurs de Los Angeles et de MDE des gravillons. La plage de performance couverte par les GTLH réalisées va de G1 à G4[2]. Les catégories de gravillons vont de B/C à F. Les données sont issues du laboratoire Screg Est de Nancy qui dispose d'un certain nombre de résultats d'études réalisées avec des calcaires exploités dans la grande région Est de la France[3].

Aucune tendance franche n'a été observée. Des essais basés sur la mesure de la résistance à la traction par fendage d'une série de mélanges dosés à un taux croissant de liant donnent une indication sur le comportement mécanique des mélanges. Par comparaison avec la résistance de la roche, l'approche permet de sélectionner les matériaux pouvant conduire à des performances de GTLH satisfaisantes.

Après un rappel des principes de formulation des GTLH, l'article présente les matériaux calcaires et les liants utilisés. La partie suivante concerne la comparaison des performances des mélanges aux propriétés mécaniques des gravillons. L'étude s'intéresse ensuite à la résistance à la traction des GTLH et de la roche d'où sont issus les gravillons utilisés.

Principes de formulation des GTLH ; quelques rappels

La méthodologie d'étude en laboratoire d'une GTLH est précisément définie par la norme NF P 98-114-1 [4]. Rappelons brièvement qu'il faut réaliser dans l'ordre :

1. un prélèvement conforme des granulats sur stocks en carrières,
2. l'identification des échantillons prélevés. Les essais pratiqués servent à déterminer les propriétés intrinsèques (LA, MDE) et de fabrication (granulométrie, aplatissement, propreté). Le référentiel de la classification est la norme granulats XP P 18-540 [5], article 7,
3. la formulation de mélanges expérimentaux, selon NF P 98-116. La granularité du mélange solide (liant compris) doit se situer de préférence dans le fuseau I de la norme (plus forte compacité),
4. une étude PROCTOR. Cette phase permet de déterminer la teneur en eau optimale. Les résultats servent aussi à fixer l'objectif de compactage des corps d'épreuves,
5. la réalisation des corps d'épreuve (éprouvettes « diabolo » et éprouvettes cylindriques). Le mélange est gâché dans un malaxeur approprié. Les éprouvettes sont moulées par vibrocompression (VCEV),
6. la mise en cure des éprouvettes (moules étanches et température de 20 ±2°C) jusqu'à l'échéance des essais,
7. la détermination du module de rigidité (E) et de la résistance à la traction (Rt) à l'aide d'une presse de traction couplée à un extensomètre, comme illustrée sur la figure 1.

Pour une même étude, plusieurs liants et plusieurs dosages sont généralement testés, pour répondre aux spécifications techniques et/ou économiques requises ou pour apprécier les performances possibles (catalogue ou appel d'offre).

Matériaux de l'étude

[2] Rappel : les performances mécaniques à 360 jours des GTLH sont classées en quatre classes, selon la position de leur point représentatif dans le diagramme E, Rt

[3] Les travaux de la référence [3] sont déjà issus de la base de donnée du laboratoire Screg Est.

Six granulats calcaires d'origine différente sont considérés dans cette étude. Ils proviennent de diverses carrières alluvionnaires ou massives implantées dans l'Est de la France. Une description sommaire de la nature pétrographique de la roche est donnée dans le tableau 1.

Les propriétés intrinsèques de ces granulats, en terme de coefficients Los Angeles (LA) [6] et Micro Deval (MDE) [7], sont présentées dans le tableau 2. Leur catégorie, définie par référence à la norme XP P 18-540 / article 7, apparaît sur la figure 2. Elle évolue de B/C à F. Les « meilleurs » matériaux sont le plus souvent d'origine alluvionnaire ; les plus « tendres » proviennent des carrières massives où l'on ne pratique généralement pas d'exploitation sélective. Notons que les mesures ont été réalisées sur les fournitures de granulats qui ont servi à la fabrication des éprouvettes de GTLH, pour limiter les incertitudes. De même, les mélanges ont été formulés avec un seul type de gravillon bien que, parfois, deux ou plusieurs granulats de diverses origines soient mélangés, pour améliorer l'indice de concasse IC ou pour corriger la granularité.

Sept liants hydrauliques routiers ont été utilisés pour confectionner les mélanges, à des dosages compris dans la fourchette habituelle adoptée pour ces produits (entre 3 et 6%). Leur appellation et leur composition qualitative sont présentées dans le tableau 3. Leurs caractéristiques détaillées peuvent être trouvées dans les fiches descriptives fournies par les producteurs.

Données et résultats

Le tableau 4 présente les résultats obtenus pour les différents matériaux (carrière). Pour chaque formule, le type de liant et son dosage sont donnés, ainsi que les performances à 360 jours. Ces performances ont été soit mesurées à 360 jours, soit extrapolées des valeurs mesurées à 60 jours. Dans le premier cas, la résistance affichée résulte du lissage de toutes les mesures réalisées durant la cure (lissage semi logarithmique). Dans le second cas, les valeurs ont été extrapolées à partir des coefficients de correspondances déterminés expérimentalement [3], rappelés tableau 5. Les valeurs de résistance à la traction (Rt) présentées ont toutes été mesurées sur éprouvettes diabolo. Notons par ailleurs que les mélanges ont été formulés de sorte que leur spectre granulaire se situe autant que possible au centre du fuseau I de la norme NF P 98-116. De même, les indices de concassages IC sont toujours égaux à 100, excepté pour la formule de la carrière 6 (IC=30).

La figure 3 présente les performances mesurées dans le diagramme E, Rt. On observe tout d'abord la tendance habituelle de l'augmentation concomitante des performances en traction et en module, avec le dosage en liant (non figuré directement sur le diagramme). On constate aussi une gradation des performances selon le liant utilisé, à l'avantage des plus riches en laitier. Les meilleures performances de cette étude (classe G4) sont obtenues avec Arc GS, pour des dosages de 3 et 3,5% déjà, et les calcaires des carrières 1 et 2, classés E et E/F. Les gravillons de la carrière 6, classés F, donnent une GTLH de classe G3, avec 3,5 % de liant seulement. Ceux classés C ne donnent pas de meilleures performances, y compris avec Arc GS, bien que les modules soient généralement supérieurs. Les classes G2 et G3 habituellement requises pour les GTLH sont donc toujours atteindre ici, quelle que soit la catégorie des gravillons calcaires utilisés (compris F), sous réserve toutefois du choix du liant approprié. D'après ces résultats et contrairement aux prescriptions de la norme, la catégorie des gravillons n'est donc pas un critère discriminant pour la formulation d'une GTLH calcaire, ce qui conforte les recommandations du guide d'application.

Les données à disposition permettent aussi de croiser les performances des mélanges (E, Rt) et des gravillons (LA et MDE). La figure 4 présente ces comparaisons. On retrouve, comme précédemment, l'influence marquée du liant mais aucune tendance franche n'apparaît, excepté peut être en traction où l'on perçoit une augmentation de cette propriété lorsque les coefficients LA ou MDE augmentent ! A l'inverse, les modules sont (en moyenne) plus élevés lorsque ces coefficients sont bas. Le contraste plus ou moins marqué entre les modules d'élasticité de la phase liante et ceux des différents granulats expliquent probablement ces comportements. Mais ces évolutions sont marginales pour pouvoir établir des corrélations franches. Ces graphiques confirment donc l'assertion précédente, puisque de bonnes performances en traction et en module sont obtenues avec des gravillons de coefficients LA et/ou MDE élevés. On notera enfin que la plage de performance des matériaux issus des carrières est plus ouverte que celle des matériaux d'origine alluvionnaire, abstraction faite du nombre de formules réalisées avec les premiers.

L'observation des plans de fracture révèle par ailleurs que les gravillons calcaires sont majoritairement cassés en présence de liants performants (Arc GS par exemple), surtout s'ils sont d'origine massive, alors que les granulats sont déchaussés avec d'autres liants. On attribue ce comportement à la bonne adhérence (physique, chimique) entre les gravillons et la matrice liante (pâte + fillers), adhérence qui renforce le « verrouillage naturel » de l'empilement des grains anguleux et rugueux. Comme signalé plus haut, le plus faible contraste des modules élastiques, entre matrice et gravillons, par rapport à des gravillons « durs », joue probablement aussi un rôle. Le plan de facture traverse indifféremment les différentes phases du composite, montrant un comportement mécanique assez comparable à celui d'un matériau homogène et isotrope. La figure 5 illustre ce propos. Elle présente l'image d'une éprouvette épuisée de béton maigre à base de matériaux de la carrière 1 et de liant Arc GS. Cette image a été réalisée avec un tomodensitomètre « Somatom Plus 4 Siemens » (ou scanner médical). La fracture suit une trajectoire induite par le champ de contrainte, sans contourner les grains calcaires.

Ces résultats incitent donc à prendre en compte la nature pétrographique des gravillons dans les spécifications des GTLH, puisque les grains calcaires « tendres » permettent finalement d'obtenir des performances intéressantes. D'ailleurs, une synthèse du chantier de l'autoroute A31 (Lorraine-Bourgogne) [8] signalait déjà, il y a plus de vingt ans, que des calcaires oolithiques et à polypiers du Bajocien lorrain, localement friables et gélifs (IG $\approx$ 70), en limite de spécification, donnaient une grave laitier non gélive et mécaniquement performante. La couche de fondation réalisée avec cette GTLH donne encore satisfaction aujourd'hui. La formule proposée par les auteurs était : granulat donné + formulation adaptée = grave laitier normale. Cet exemple, qui a permis « d'économiser » les ressources alluvionnaires locales, anticipait les propos du guide d'application des normes pour le réseau routier national…

Rappelons par ailleurs que le traitement des calcaires aux liants hydrauliques améliore leur résistance au gel (fait souvent constaté), y compris pour les faciès les plus tendres (craies par exemple).

Les caractéristiques intrinsèques n'étant apparemment pas discriminantes pour les calcaires utilisés en techniques de chaussées, une relation entre les performances mécaniques à la traction des mélanges et de la roche a alors été recherchée.

Prévision des performances à partir de la résistance à la traction de la roche

Cette partie relate une expérience réalisée avec les matériaux calcaires de la carrière 2 (classés E/F). Un sable 0/5 et un gravillon 5/16 ont été mélangés au liant routier LSC+, à des taux croissants de 4, 8, 12, 16 et 20 % de la masse totale du mélange sec. Ce liant, destiné aux matériaux calcaires, remplace aujourd'hui Arc GS. Dans ces mélanges, le volume de gravillon a été gardé constant et une partie du sable a été substitué par le liant, pour rester dans le fuseau de spécifications. La granularité des mélanges est donnée dans le tableau 6. Des éprouvettes cylindriques 10x20 cm ont été moulées par vibrocompression, en adoptant la « consistance » de la référence Proctor modifié des formules à faible dosage en liant. Pour les forts dosages, la quantité d'eau a été ajustée de façon à retrouver cette consistance caractérisée par le comportement du mélange soumis au même nombre de chocs entre deux plaques de plexiglas. Les dosages en eau sont portés dans le tableau 6. Les éprouvettes ont été sollicitées au fendage après 60 jours de cure. Les résistances moyennes à la traction obtenues (Rtb_{60}) sont également portées dans le tableau 6, avec les valeurs de traction directe extrapolées à 360 jours (Rt_{360}), selon la relation :

$$Rt_{360} = 0{,}80 \frac{Rtb_{60}}{0{,}78} \qquad (1)$$

où :

- 0,80 est le rapport usuel entre traction directe et fendage [3],
- 0,78 est coefficient de correspondance pour une GTLH à base de calcaire massif et d'Arc Gs (tableau 5 [3]).

Le graphique de la figure 6a montre l'évolution de Rt_{360} en fonction du taux de liant. On constate que la résistance augmente « rapidement » jusqu'à 8% de liant, puis « stagne » ensuite.

Par ailleurs, la résistance à la traction par fendage de la roche à été mesurée sur plus d'une dizaine des carottes cylindriques de diamètre 54 mm et de longueur 50 à 70 mm, prélevées in situ selon les directions perpendiculaires ou parallèles à la stratification. Notons que deux faciès « gris » et « jaune » sont présents dans la formation (et dans les granulats). Leur résistance moyenne en traction directe a été obtenue par application du coefficient 0,80 sur les valeurs de fendage. De plus, cette résistance a été pénalisée par un coefficient d'effet d'échelle [9] estimé à 0,95, pour tenir compte de la différence de taille[4] entre éprouvettes de roche et de GTLH. La relation est la suivante :

$$Rt = 0{,}80 \,.\, 0{,}95 \,.\, Rtb = 0{,}76 \,.\, Rtb \qquad (2)$$

Les valeurs obtenues sont assez contrastées : celle du faciès gris est de 4,3 MPa (écart type 0,83) et celle du faciès jaune est de 2,8 MPa (écart type 0,33).

Le pourcentage de chaque faciès dans les mélanges a été déduit du comptage des gravillons (taille supérieure à 4 mm) sur les plans de fracture. Il est d'environ 30% pour le faciès gris et de 70% pour le faciès jaune. L'observation des plans de fracture montre aussi qu'il n'y a pas de déchaussements des grains, quel que soit le faciès et le dosage, prouvant la bonne affinité entre matrice et granulats. La résistance moyenne des gravillons, calculée par simple pondération entre résistance et pourcentage de chaque faciès, est reportée sur la figure 6a (ligne bleue), avec l'écart type moyen calculé selon les lois de la statistique. On constate que

[4] La résistance à la traction est d'autant plus amplifiée que les corps d'épreuves sont petits.

la résistance à la traction du composite atteint, puis dépasse celle du granulat, lorsque le dosage en liant augmente.

Au-delà de 12%, le dosage en liant rejoint celui des bétons hydrauliques, pour lesquels un comportement analogue est décrit à la compression [10]. En effet, dans ces matériaux, si la résistance de la matrice devient prépondérante sur celle des granulats (grâce à des rapports e/c faibles), la résistance à la compression du composite peut dépasser celle du granulat. Le modèle théorique avancé est celui de la sollicitation « en parallèle » des deux phases (matrice et granulat). Par ailleurs, pour une résistance de matrice donnée, la résistance du composite se trouve aussi renforcée si l'adhérence pâte-granulat est bonne. C'est la nature triaxiale des contraintes dans la matrice liante confinée qui explique ce surcroît de résistance à la compression. En « transposant » ces deux modèles à la traction – approche justifiable compte tenu des relations existant entre les deux types de contraintes [10] – le dépassement de la résistance des gravillons calcaires est alors interprétée comme la combinaison de la résistance élevée de la matrice (due aux rapports e/c faibles obtenus sans ajout substantiel d'eau, cf. tableau 6) et de la bonne adhérence entre matrice et grains.

On remarque toutefois (figure 6a) que le taux de liant nécessaire pour dépasser la résistance des gravillons est supérieur au dosage maximum préconisée pour une GTLH, soit 6%. En d'autres termes, *pour les dosages habituels en liant (compris entre 3 et 6%), c'est la résistance à la traction du gravillon qui reste le facteur limitant des GTLH calcaires*. Dans le cas présent, comme cette résistance est supérieure à la résistance requise pour les différentes classes de performances (figurées par des traits noirs sur la figure 6a, pour un module moyen E de 30 GPa), il est donc « normal » que les classes G3 et G4 soit atteindre, en ajustant simplement le dosage en liant (approprié aux calcaires).

Ce résultat amène à proposer la sélection des granulats calcaires destinés aux GTLH par la résistance moyenne à la traction de la roche d'où sont issus les matériaux[5]. Si cette résistance est supérieure à la limite minimale de la classe visée, on pourra en principe toujours obtenir cette classe en ajustant le dosage du liant spécifique sélectionné.

À titre d'exemple, cette approche a été appliquée aux matériaux de la carrière 1, classés E, qui comporte plusieurs faciès calcaires différents. La résistance à la traction directe des diverses roches mères, mesurée sur le même type de carottes que précédemment, a été déduite des résistances au fendage selon la relation 2. Elle est en moyenne de 2,85 MPa. L'écart type élevé de 0,70 s'explique par la présence des différents faciès. Cette résistance est comparée à la Rtb_{360} des six formules de GTLH réalisées avec Arc GS (tableau 4), liant de nature comparable à LSC+. Les résultats sont reportés sur la figure 6b. On vérifie bien que la résistance à la traction de la roche calcaire est suffisante pour donner des GTLH de classes G2 à G4, avec 3 et 4% de liant seulement.

Conclusion

Cette étude cherchait à établir des comparaisons entre les performances (E, Rt) d'une quarantaine de GTLH calcaires et les caractéristiques intrinsèques (LA, MDE) des gravillons utilisés. Elle montre finalement que la qualité mécanique normative des granulats calcaires ne constitue pas un facteur limitant des performances de ce type de produit, puisque les classes G2/G3, voire G4, sont obtenues avec les différents gravillons testés, y compris ceux classés F.

[5] il faut cependant pouvoir accéder à la roche mère, ce qui limite le principe aux carrières massives

Une granularité centrée dans le fuseau de spécification et l'emploi d'un liant approprié explique les « bonnes » performances obtenues dans le cas présent. Le faible contraste entre les modules d'élasticité de la roche « tendre » et de la matrice liante, ainsi que la bonne adhérence matrice gravillon, améliorent la résistance à la traction des mélanges, qui sont mécaniquement plus homogène. Ce comportement, plutôt spécifique aux matériaux calcaires, n'est pas pris en compte par la norme NF P 98-116 actuelle, qui ne distingue pas la nature des grains.

Ce résultat ouvre des perspectives d'utilisation de certaines ressources minérales calcaires jusqu'ici écartées pour les corps chaussées (en Lorraine notamment), afin de préserver les ressources (alluvionnaires) de meilleures qualités pour des usages plus nobles, conformément au concept actuel du développement durable.

Enfin, la recherche des performances maximales en traction de plusieurs GTLH calcaires contenant le même gravillon peu résistant et une quantité croissante de liant montre que la résistance de la roche contrôle celle de ces produits. La mesure de cette propriété paraît alors mieux adaptée que les essais Los Angeles et Micro Deval pour sélectionner les matériaux calcaires destinés à la fabrication des GTLH.

Bibliographie

[1] AFNOR, 2000, NF P 98-116, Graves traitées aux liants hydrauliques

[2] SETRA/LCPC, 1998, Assises de chaussées – Guide d'application des normes pour le réseau routier national.

[3] Voirin J., Desmoulin D., Lecomte A., 2001, Prévision de la résistance à long terme de mélanges routiers traités aux liants hydrauliques, Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées, 231, pp. 3-16

[4] AFNOR, 1992, NF P 98-114-1, Méthodologie d'étude en laboratoire des matériaux traitées aux liants hydrauliques

[5] AFNOR, 1997, NF XP P 18-540, Granulats – Définitions, conformité, spécifications

[6] AFNOR, 1990, NF P 18-57, Granulats – Essai Los Angeles

[7] AFNOR, 1990, NF P 18-572, Granulats – Essai d'usure Micro-Deval

[8] Camut J., Causero L., 1984, l'Autoroure A31, section Toul-Montigny-le-roy, Laitiers de hauts fourneaux, n° 55/1, pp. 20-39.

[9] Rossi P., Wu X., Le Maou F., Belloc A., 1994, Scale effect in concrete in tension, Materials and structures, Vol. 27, pp.437-444.

[10] De Larrard F., traduit de l'anglais par Lecomte A., 2000, Structures granulaires et formulation des bétons, Etudes et Recherches du LCPC, OA 34, 414 p.

FIGURES

Figure 1 : Mesure du module de rigidité E et de la résistance à la traction Rt d'une GTLH sur éprouvette « diabolo »

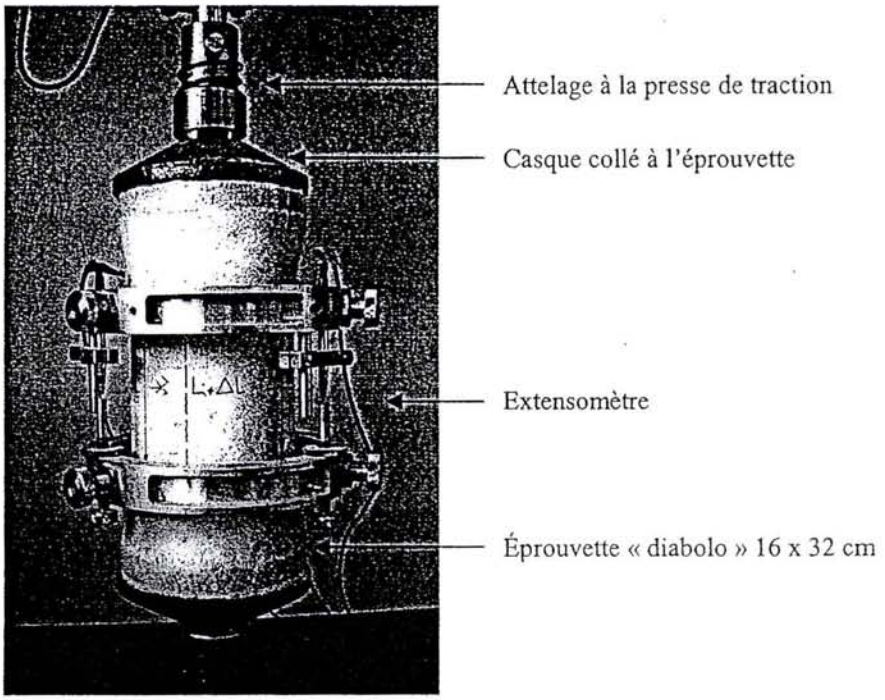


Figure 2 : Classification des granulats calcaires de l'étude, au regard de la norme XP P 18-540 / article 7

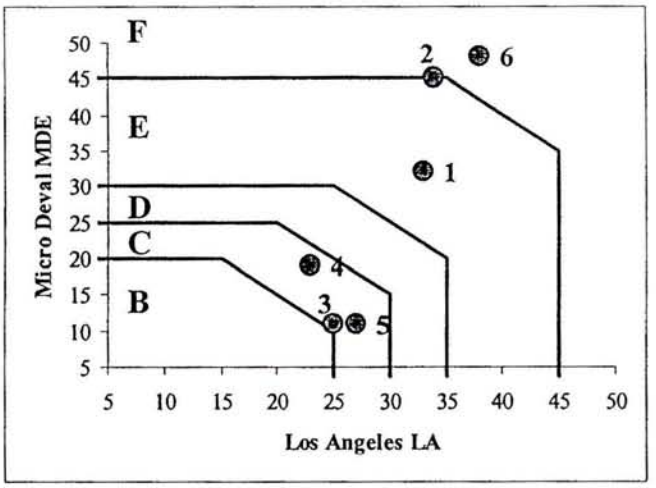


Figure 3 : Classification mécanique des GTLH calcaires, selon NF P 98-116.

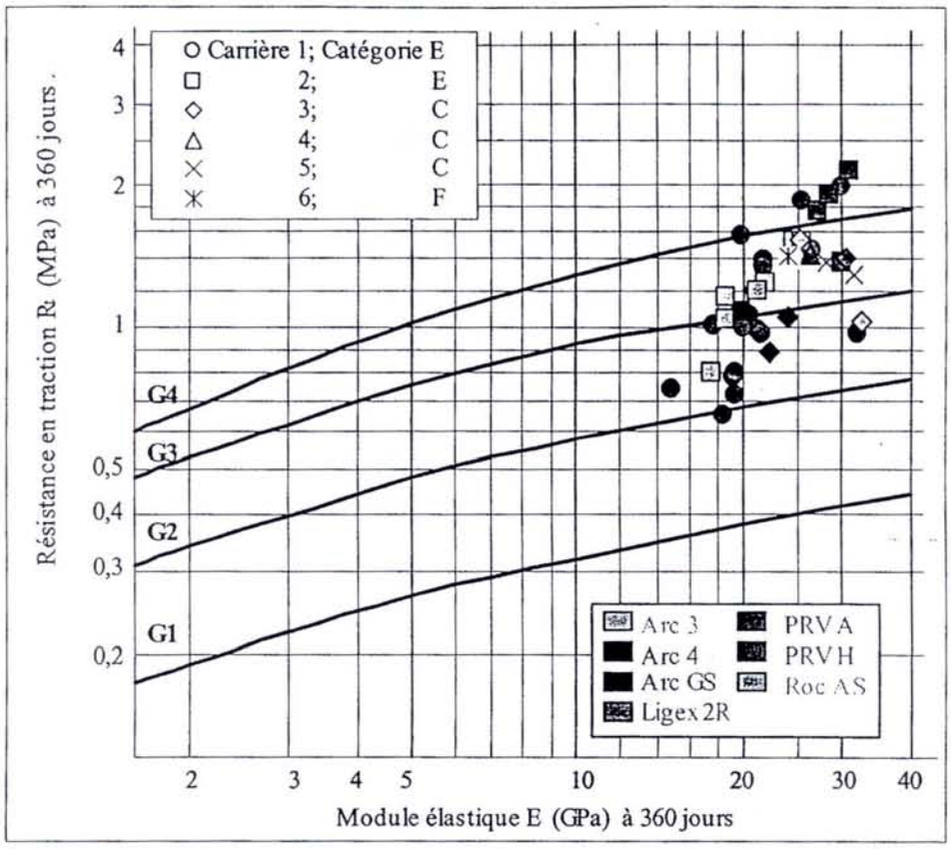


Figure 4 : Relations entre propriétés intrinsèques des gravillons calcaires et performances des GTLH.

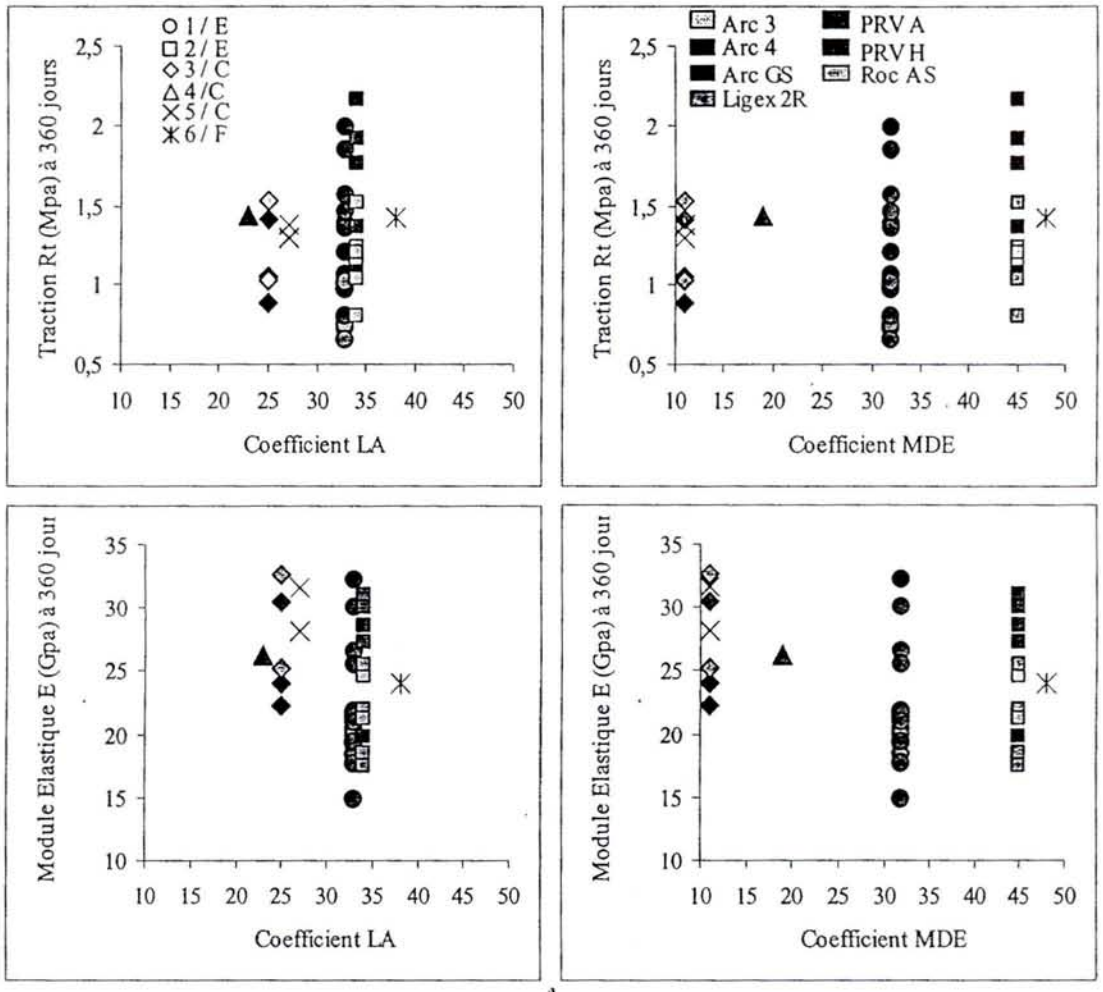


Figure 5 : Coupe (tomodensitomètre) d'une éprouvette 16x32 de béton calcaire maigre (carrière 1) épuisée en compression.

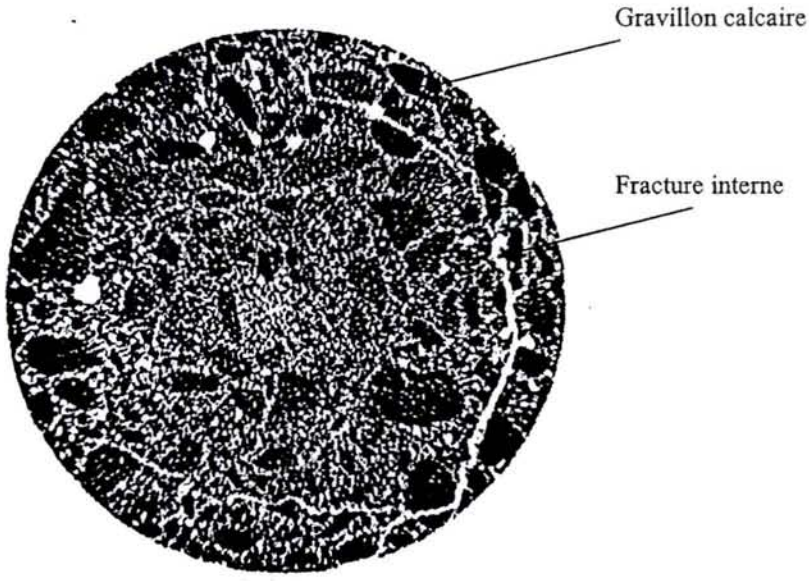


Figure 6a : Evolution de la résistance à la traction en fonction du taux de liant (LSC+). Granulats de la carrière 2.

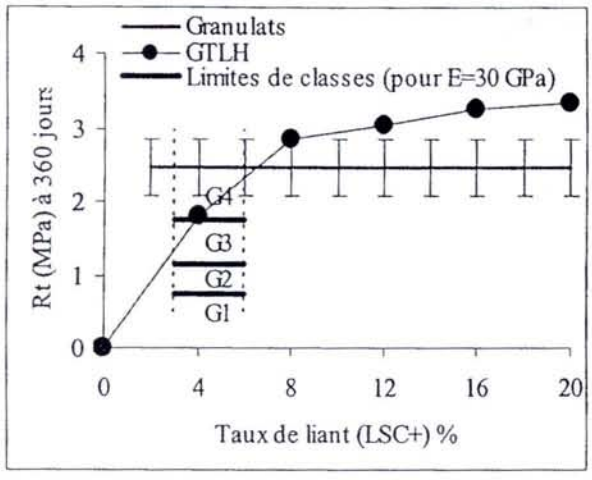
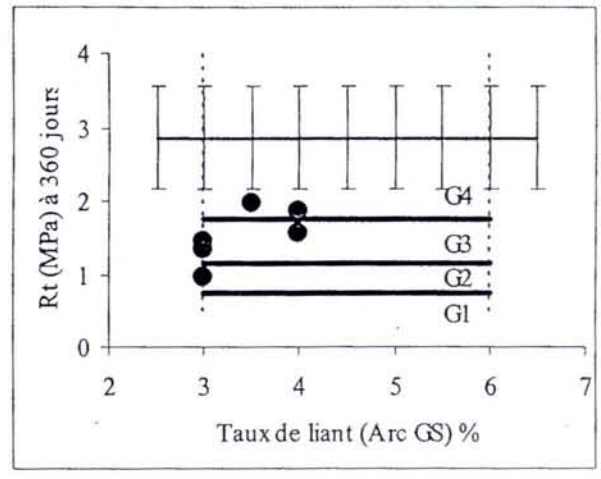


Figure 6b : Comparaison de la résistance à la traction des GTLH avec celle de la roche mère. Granulats de la carrière 1.



TABLEAUX

Tableau 1 : Origine et pétrographique sommaire des granulats calcaires de l'étude

Carrière	Gisement	Pétrographie sommaire
1	Roche massive	Calcaires à polypiers, à entroques et oolithique
2	Roche massive	Calcaires oolithiques et coquilliers
3	Alluvionnaire	Silico-calcaire à dominante calcaire (alluvions de la Saulx)
4	Roche massive	Calcaires oolithiques avec polypiers
5	Alluvionnaire	Silico-calcaire à dominante calcaire (alluvions de la Marne)
6	Alluvionnaire	Silico-calcaire à dominante calcaire (alluvions de la Vesle)

Tableau 2 : Caractéristiques intrinsèques des granulats
(Valeurs moyennes contemporaines aux études des GTLH)

Carrière	LA	MDE	Catégorie (P 18-540)
1	33	32	E
2	34	45	E/F
3	25	11	B/C
4	23	19	C
5	27	11	C
6	38	48	F

Tableau 3 : Composition de base des liants hydrauliques utilisés dans cette étude

Appellation commerciale		Arc 3	Arc 4[a]	Arc GS[b]	Ligex 2R	PRV A[c]	PRV H	Roc AS
Constituants	Laitier HF	X	X	X	X	X	X	X
	Chaux vive	X			X	X		
	Gypse/Anhydrite	X	X	X	X	X	X	X
	Clinker		X				X	X
	Cendres Volantes					X		
	Fillers						X	

[a] Les liants ARC 4 et ROC AS sont équivalents et sont dorénavant proposés sous l'appellation unique ROC AS
[b] Liant actuellement remplacé par LSC+
[c] Liant actuellement remplacé par PRV H

Tableau 4 : Dosages en liant et performances des GTLH réalisées avec les matériaux des différentes carrières.

Carrière 1. Gravillons de catégorie E

Liant	Dosage %	$Rt_{360\,j}$ MPa	$E_{360\,j}$ GPa	Classe
Arc 4	3	0,79	19,2	G2
Arc 4	3	1,06	20,4	G3
Arc 4	3,5	0,97	32,2	G2
Arc 4	4	0,99	21,2	G2
Arc 4	4	1,39	21,6	G3
Arc GS	3	1,46	26,5	G3
Arc GS	3	0,97	21,5	G2
Arc GS	3	1,35	21,8	G3
Arc GS	3,5	1,98	30	G4
Arc GS	4	1,56	19,9	G3
Arc GS	4	1,85	25,5	G4
PRV A	3	0,72	19,4	G2
PRV A	3	0,74	14,8	G2
PRV A	4	1	20	G2
PRV A	4	0,65	18,4	G1
PRV A	4	1,01	17,6	G2
PRV H	3,5	0,8	19,3	G2
PRV H	4,5	1,2	21	G3

Carrière 2. Gravillons de catégorie E/F

Liant	Dosage %	Rt_{360j} MPa	$E_{360\,j}$ MPa	Classe
Arc 3	3,5	1,16	18,5	G3
Arc 3	4,5	1,52	24,6	G3
Arc 4	3,5	1,08	19,8	G3
Arc GS	3,5	1,37	30	G3
Arc GS	3,5	1,76	27,2	G4
Arc GS	4,5	1,92	28,5	G4
Arc GS	5,5	2,16	31	G4
Ligex 2R	3,5	0,80	17,5	G2
Ligex 2R	3,5	1,04	18,9	G2
Ligex 2R	4,5	1,24	22	G3
Ligex 2R	5,5	1,52	25,5	G3
Roc AS	4,5	1,2	21,2	G3

Carrière 3. Gravillons de catégorie B/C

Arc 4	3,5	0,89	22,3	G2
Arc 4	3,5	1,05	24,0	G2
Arc GS	3,5	1,41	30,5	G3
Ligex 2R	3,5	1,35	25,2	G3
Ligex 2R	3,5	1,03	32,6	G2

Carrière 4. Gravillons de catégorie C

Arc GS	6	1,43	26,2	G3

Carrière 5. Gravillons de catégorie C

Arc 4	3,5	1,38	28,1	G3
Ligex 2R	3,5	1,29	31,6	G3

Carrière 6. Gravillons de catégorie F

Arc GS	3,5	1,42	24	G3

Tableau 5 : Rappel des coefficients de correspondances proposés par [3]

		Graves Traitées aux Liants Routiers (GTLR)				Sables Traités aux Liants Routiers (STLR)					Graves traitées au Ciment (GC)			
Guide d'application		0,65 (60 jours)				0,65 (60 jours)					0,60 (28 jours)			
Etude		0,74 (0,10)*				0,69 (0,10)					0,72 (0,16)			
Gisement		Massif		Alluvions		Massif		Alluvions			Massif		Alluvions	
	Granulats	Calcaire		Calcaire	Siliceux** +Calcaire	Calcaire	Siliceux* +Calcaire	Calcaire	Siliceux* +Calcaire	Siliceux	Calcaire		Calcaire	Siliceux
Liants	Ligex 2R	0,82 (0,07)		0,70 (0,06)		0,76 (0,07)								
	Roc As	0,77 (0,06)		0,71 (0,11)		0,68 (0,05)								
	Arc GS	0,78 (0,09)		0,73 (0,12)		0,65 (0,05)		0,67 (0,03)						
	Arc 3	0,72 (0,04)								0,61 (0,03)				
	Arc 4	0,79 (0,08)												
	Prv A	0,66 (0,07)		0,67 (0,04)		0,65 (0,05)								
	CLK										0,73 (0,18)		0,78 (0,07)	0,56 (0,06)
	Tous liants confondus	0,77 (0,09)		0,71 (0,09)	0,63 (0,05)	0,71 (0,10)		0,67 (0,03)	0,64 (0,07)	0,61 (0,03)				

* les valeurs entre parenthèse sont les écarts-types sur les coefficients

** ces granulats sont issus de sablons

Tableau 6 : Granularité (passants), teneur en eau et résistances des différents mélanges

% de liant		4	8	12	16	20
Ouverture de tamis (mm)	20	100	100	100	100	100
	16	99	99	99	99	99
	14	94	94	94	94	94
	12,5	88	88	88	88	88
	10	80	80	80	80	80
	8	69	69	69	69	69
	6,3	57	57	57	57	57
	5	47	48	48	48	48
	4	43	43	44	44	45
	3,15	39	40	41	42	43
	2	34	36	37	38	40
	1	30	31	33	35	37
	0,5	26	28	30	32	34
	0,315	22	25	27	30	32
	0,2	18	21	24	27	30
	0,08	13	16,5	19,7	23	26,3
Teneur en eau (ppc)		7,5	8,4	9	9,5	9,7
Rtb (MPa) à 60 j.		1,77	2,79	2,96	3,19	3,27
Rt (MPa) à 360 j.		1,82	2,86	3,04	3,27	3,35

PUBLICATION 3

Analyse des propriétés des grains par mesure de la compacité des tranches granulaires (2000)

Analyse des propriétés des grains par mesure de la compacité des tranches granulaires

André Lecomte — Jean-Michel Mechling — Jean Voirin
Nelly Vulcano

Equipe de Géologie Appliquée au Génie Civil, JE 2167 Structures & Matériaux
IUT de Nancy-Brabois – Le Montet, F-54601 Villers-lès-Nancy cedex
lecomte@iutnb.u-nancy.fr

RÉSUMÉ. *Les césures définissant les différentes coupures granulaires (fines, sables, graviers...) résultent de conventions qui ne coïncident pas toujours avec la réalité des autres propriétés physiques (masse volumique, porosité...). C'est ce que révèlent des mesures de compacité réalisées sur les tranches élémentaires de granulats gréseux, mesures associées aux nouvelles méthodes de formulation des mélanges granulaires. Pour ces matériaux, elles ont montré que la distinction entre fines et sables se situait plutôt vers 400 µm, limite physique entre particules fines individualisées et grains composés plus gros. Les séparations à 63 ou 80 µm, souvent préconisées, à juste titre, par les normes, pour de nombreuses applications, paraissent donc non fondées dans le cas présent. Ce sont les propriétés morphologiques des grains liées à l'histoire géologique du matériau qui en sont la cause.*

ABSTRACT. *The caesuras defining the different granular fractions (fine, sand, gravel...) result from conventions which do not always conform to the reality of the other physical properties (specific density, porosity...). That is revealed by measures of packing density carried out on the elementary classes of sandstone aggregates, associated with the new methods of granular mix proportioning. For these materials, it has been shown that the distinction between fine and sand was located rather around 400 µm corresponding to, the physical limit between individualised fines grains and composed, coarser grains. In the present case, the separations at 63 or 80 µm, that are often recommended by the standarts, and quite rightly so, for numerous applications, are therefore proved unfounded. The reason is the morphological properties of grains linked to the geological history of the material.*

MOTS-CLÉS : *compacité, grès, fines, sable, morphologie, formulation des mélanges.*

KEYWORDS: *packing density, sandstone, fillers, sand, morphology, mix-proportioning.*

1. Introduction

Depuis peu, certaines méthodes de composition des mélanges granulaires font appel à la mesure de la compacité des tranches élémentaires [LAR 99]. Cet essai, comparé aux essais conventionnels, traduit mieux le lien pouvant exister entre les propriétés des mélanges et les diverses propriétés morphologiques et physiques des grains élémentaires.

La technique, complémentaire à l'analyse granulométrique, consiste à relever le volume solide des grains de même taille (ou de classes associées par petits nombres) lorsqu'ils sont soumis à une contrainte sous vibration dans un récipient cylindrique. Les interactions granulaires tributaires de l'état de surface des matériaux entrent alors en jeu, ce qui, à défaut d'autres essais, permet d'expliquer par exemple le comportement différent de deux matériaux de granularité identique. Cette méthode de mesure a été appliquée à des granulats gréseux extraits des Grès du Luxembourg [LEC 99], [MEC 99]. Elle a révélé que la césure normative à 63 ou 80 µm, entre fines et sables, n'avait pas réellement de sens physique, et qu'il fallait plutôt chercher à séparer ces deux coupures vers 400 µm. Elle est appliquée ici à des matériaux de même origine, mais produits par un nouveau mode de concassage.

Après une présentation des principales propriétés mesurées sur les matériaux gréseux, cet article rappelle la technique de mesure de la compacité des tranches granulaires élémentaires, et celle réservée aux éléments plus fins. Les résultats, analysés par étapes successives, amènent à la même conclusion que précédemment, à savoir que les deux familles de grains présentes dans ces matériaux se séparent vers des dimensions qui ne sont ni celles des coupures industrielles, ni celles préconisées par les normes.

2. Nature et propriétés des matériaux

Deux granulats provenant des Grès du Luxembourg – un sable 0/2 et un gravillon 4/16 – ont fait l'objet de cette étude. Du point de vue de la géologie, ces matériaux sont des grès à matrice calcaire d'origine terrigène et thalassogène d'âge Hettangien supérieur. Ils forment une lentille régionale de plus de cent mètres d'épaisseur constituée d'une imbrication de faciès de résistance mécanique très variable, allant de sables peu consolidés à des roches bien indurées.

En carrière, après abattage, le tout venant est concassé dans un matériel à percussion pour donner après criblage le sable primaire 0/2 étudié ici. Le refus est ensuite passé soit dans un concasseur giratoire, soit dans un concasseur à percussion, selon l'usage réservé au gravillon. Le gravillon 4/16 provient du concassage à percussion.

Les deux matériaux ont été soumis aux principaux essais usuels normatifs de caractérisation des granulats. Les résultats de ces tests sont donnés dans le tableau 1,

ainsi que sur la figure 1 qui présente la granularité du gravillon, du sable et des fines inférieures à 80 µm, déterminée par sédimentométrie. Notons dès à présent que la masse volumique réelle et le coefficient d'absorption du sable ont été soigneusement mesurés sur le matériau tel quel, selon la norme NF P 18-555.

Critères	Sable 0/2	Gravillon 4/16
Masse volumique réelle (kg/m3)	2627	2392
Absorption (%)	0,60	2,75
Teneur en CaCO3	12,3	45,0
Teneur en fines (<80µm)	10,0	2,5
Module de finesse	1,2	5,8
Aplatissement	-	16,4
Coefficient volumétrique	-	22,0
Résistance à la compression (MPa)	-	50 à 80
Résistance à la traction (MPa)	-	3 à 5
Los Angeles	-	36,0
Micro Deval en présence d'eau	-	35,2

Tableau 1. *Propriétés des granulats gréseux, mesurées selon les normes en vigueur.* Properties of the sandstone aggregates

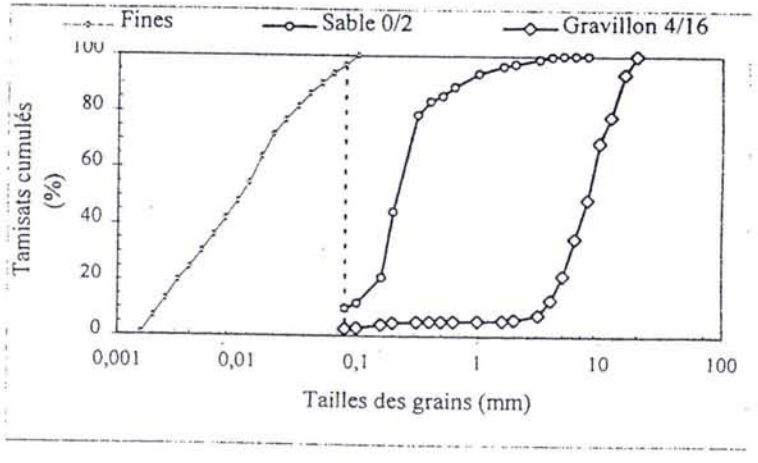


Figure 1. *Granularité des matériaux.* Materials grading curves

Ces analyses montrent que les matériaux sont assez particuliers :
– le 4/16, formé quasi exclusivement de fragments de grès, est assez poreux (absorption plutôt élevée). Sa masse volumique réelle est donc plus faible que celle

du sable constitué majoritairement de grains de quartz individualisés (masse volumique réelle proche de celle de la silice et absorption très faible) ;
– la teneur en carbonate de calcium est bien plus élevée dans le gravillon, en raison de la présence d'une matrice calcitique quasi absente dans le sable ;
– le sable contient plus de 60% de grains compris entre 100 et 300 µm. Son «D_{50}» est de 220 µm et son module de finesse n'est que de 1,2 ;
– le gravillon 4/16 présente, lui aussi, dans sa fraction inférieure à 1 mm, une part non négligeable d'éléments compris entre 100 et 300 µm (inflexion de la courbe dans cette tranche de tailles). La présence de cette classe granulaire est à rapprocher, de toute évidence, de la nature du grès qui résulte essentiellement de la cimentation de grains de quartz compris dans cette fourchette de tailles. Ces grains, liés par la matrice calcaire, sont libérés des faciès les plus tendres par attrition (stockage, manutention...) ;
– les autres propriétés normatives décrivant la forme (aplatissement moyen, coefficient volumétrique moyen) et les propriétés mécaniques des gravillons sont habituelles pour ce genre de matériau.

Bien qu'issues du même matériau et du même gisement, ces deux coupures ont des propriétés physiques assez distinctes. Il était donc intéressant de vérifier si ces changements de propriétés concordaient ou non avec les coupures industrielles ou la limite normative entre fines et grains plus gros. La technique adoptée pour mener cette investigation est détaillée ci-après.

3. Techniques de mesure des compacités élémentaires

Les mesures de compacité dont il est question ici sont réalisées soit directement sur les classes élémentaires d/D des granulats extraits par tamisage ($D = d\sqrt[10]{10}$ en général), soit déduites d'une mesure de compacité sur poudres (fines).

Dans le premier cas, la technique proposée [SED 94] consiste à placer dans un conteneur cylindrique de diamètre ∅ un échantillon de la classe analysée de masse sèche *Ms*, et à le soumettre à une vibration de 60 Hz[1] pendant 2 minutes, sous une pression de 10 kPa transmise perpendiculairement par un piston plat. Le volume granulaire apparent *V* est calculé à partir de la section *S* du conteneur et de la hauteur minimale *h* de l'empilement déterminée après plusieurs essais. Le volume réel des grains *g* est simplement déduit de *Ms* et de la masse volumique réelle du matériau ρ_r. La compacité *c* est alors :

$$V = Sh \qquad g = \frac{Ms}{\rho_r} \qquad c = \frac{g}{V} = \frac{Ms}{Sh\rho_r} \qquad [1]$$

Il se produit toutefois aux limites du récipient un effet de paroi [CAQ 37] qui « décompacte » l'empilement sur une certaine distance. Selon Ben Aïm [BEN 70], ce phénomène agit sur une distance égale à *d/2*, et il est pris en compte par le biais d'un coefficient k_w ajusté expérimentalement à 0,87 et 0,71 pour des grains roulés et concassés. La compacité non confinée *C* est alors déduite de *c* selon la relation :

$$C = qc, \quad \text{avec} \quad q = \frac{1}{1-(1-k_w)\left[1-\left(1-\frac{d}{\varnothing}\right)^2\left(1-\frac{d}{h}\right)\right]} \qquad [2]$$

Dans le second cas, il est exclu, pour diverses raisons, de mesurer directement sur des fines la compacité de chaque tranche élémentaire. On passe donc par un modèle[2] qui restitue la compacité mesurée C_m de tout le produit (dont on connaît la granularité), après avoir ajusté par itération une fonction décrivant la variation des compacités élémentaires C_i. On se satisfait généralement d'une fonction constante sur l'intervalle considéré. On peut choisir aussi une fonction logarithmique linéaire dans le repère granulométrique, en cherchant par exemple, comme ici (voir ci-après), la coïncidence avec les mesures de compacités faites sur les plus petits tamis.

La compacité C_m est déduite de la quantité d'eau *W* qui amène, dans un malaxeur à mortier tournant en vitesse rapide, une masse *Ms* de poudre à un état de « pâte lisse » [SED 94]. Dans cet état standard, caractérisé par un indice de serrage[3] particulier [SED 99], on admet que les interstices entre les grains sont rigoureusement emplis d'eau et que les particules commencent à être suspendues dans la phase aqueuse continue. La teneur en eau *W/Ms* sert alors à calculer la compacité du mélange C_m selon la relation :

$$C_m = \frac{1}{1+\rho_a \frac{W}{Ms}} \qquad [3]$$

où ρ_a est la masse volumique absolue de la poudre.

Cet essai peut être réalisé en présence d'un adjuvant défloculant, en tenant compte de sa teneur en eau, si les fines doivent être incorporées dans des mélanges comportant de tels produits.

4. Résultats

Les compacités élémentaires mesurées sur le sable et sur le gravillon gréseux sont portées sur la figure 2. Le lissage adopté pour les fines (issues du sable 0/2) vérifie simultanément : i) la compacité mesurée C_m lorsqu'elle est recalculée avec un

[2] Le Modèle d'Empilement Compressible par exemple [LAR 99].

[3] L'indice de serrage est un paramètre qui caractérise ici l'intensité de compaction des fines

modèle prédictif de compacité ; ii) la continuité logique avec les valeurs obtenues sur les tranches supérieures du sable 0/2, du moins à proximité de la séparation physique à 80 µm.

On découvre alors : i) que les compacités du 4/16 (et des éléments plus fins associés) sont supérieures de 10 à 20 % à celles du sable, quelles que soient les tailles ; ii) qu'il existe pour chaque matériau deux familles de points correspondant soit aux éléments grossiers de tailles supérieures à 600 µm, soit aux fines et aux éléments associés de tailles inférieures à 200 µm. Une césure apparaît dans la zone située vers 400 µm ; iii) que dans chaque famille, une nette décroissance de la compacité avec la taille des grains peut être observée.

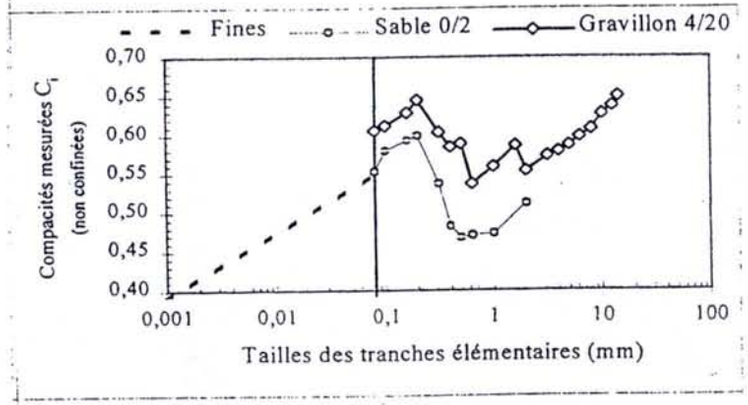


Figure 2. *Compacités élémentaires mesurées sur les grès.* Elementary packing density measured on sandstone

L'origine de ces écarts a tout d'abord été recherchée au niveau des masses volumiques réelles prises en compte dans les calculs. En effet, les propriétés physiques considérées à ce stade sont celles mesurées selon les normes, sur les deux granulats. Ce sont des valeurs moyennes qui ne correspondent pas forcément aux propriétés effectives de chaque tranche élémentaire de chaque matériau ou, du moins, à celles des deux familles de grains qui apparaissent sur cette figure.

Les compacités ont alors été recalculées en considérant, en première approximation, pour chaque matériau, une masse volumique réelle pour les particules fines (< 400 µm) et une masse volumique réelle pour les grains plus gros. La masse volumique des éléments fins a été déterminée sur un mélange 0,100/0,200 du sable primaire, et étendue à la fraction 0/0,400. Elle est de 2635 kg/m3, c'est-à-dire un peu supérieure à celle du sable entier (tableau 1) qui comporte un certain pourcentage de grains

Les nouveaux volumes solides obtenus sont portés sur la figure 3. On y découvre que le traitement a eu pour effet de superposer les deux courbes. Toutefois, la césure initialement observée vers 400 µm subsiste toujours, tout en étant atténuée en amplitude.

L'affectation d'une valeur de masse volumique réelle pertinente à chaque coupure élémentaire n'a donc pas suffit à gommer le comportement binaire initialement observé. Elles ont toutefois permis de réunir les compacités des éléments grossiers d'une part et celles des éléments fins d'autre part, et de proposer un lissage satisfaisant pour chaque famille de grains (figure 3). Le premier concerne les éléments de tailles supérieures à 500 µm, le second se rapporte aux éléments fins inférieurs à 400 µm associés aux fines. Observons que l'excellente continuité obtenue pour ce dernier démontre clairement que la coupure habituelle à 80 µm, entre fines et grains, n'a pas de fondement physique dans le cas présent.

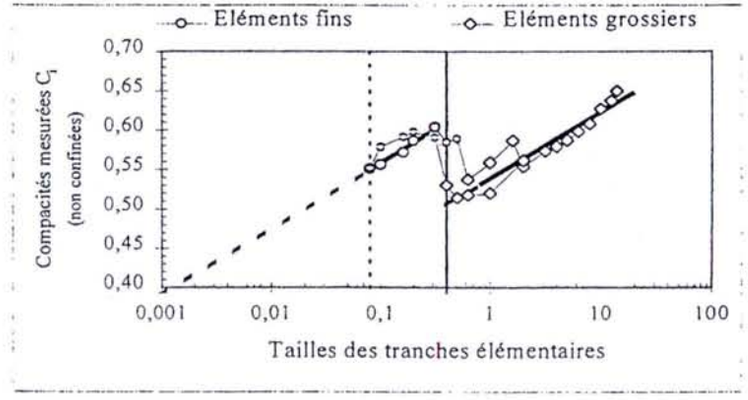
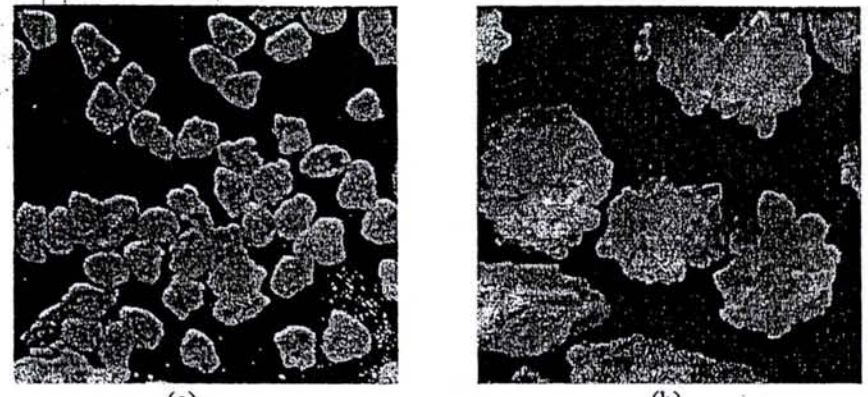


Figure 3. *Compacités selon les fractions fines et grossières. Lissages.* Packing density v.s. fines or coarse fractions. Smoothing.

Reste encore à trouver l'origine des phénomènes qui différencient autant la qualité des empilements élémentaires. Ce sont en fait les propriétés d'état de surface et morphologiques des grains qui interviennent ici. En effet, lorsque l'on observe ces matériaux à la loupe binoculaire (figure 4), on vérifie bien que les éléments fins ont des surfaces généralement arrondies et lisses, alors que les éléments plus gros ont des formes irrégulières et anguleuses, ce qui explique déjà en soi la césure observée.

De plus, la surface des éléments grossiers présente une certaine rugosité (aspérités, proéminences) qui

des grains à surface lisse). Par contre, la forme des grains varie avec la taille, comme cela avait déjà été constaté antérieurement [LEC 99], et il existe bien une corrélation entre les compacités élémentaires et, par exemple, les coefficients partiels d'aplatissement (calculés d'après les différentes pesées réalisées durant l'essai) ; les petits grains du 0,400/20 sont bien plus plats et allongés que ne le sont les gros et leur compacité en est d'autant réduite (figure 3). Toutefois, le mode de concassage améliore sensiblement la valeur moyenne d'aplatissement, qui passe de 22 à 16 lorsque les matériaux secondaires subissent soit un concassage giratoire, soit un concassage à percussion [MEC 99].



(a) (b)

Figure 4. Aspect des grains : (a) grains fins arrondis (0,2 mm) ; (b) grains grossiers rugueux (1 mm). *Aspect of aggregates: (a) small round grains (0.2 mm) ; (b) coarser rough grains (1 mm)*

Au niveau géologique, on observe que les grès les plus durs, bien que formés de bancs d'aspect compacts, présentent en réalité une stratification qui se marque par un délitement et des fractures en marches d'escalier de hauteur inférieure à 10 mm. Au concassage, ce sont ces « litages » qui cèdent en premier et qui favorisent l'apparition de grains plats d'épaisseur égale ou inférieure à celle des strates élémentaires.

Pour les petits grains de grès et les fines associées, outre le fait que le nombre de points de contact durant la mesure peut réduire l'efficacité de l'empilement, c'est probablement leur forme qui joue encore un rôle déterminant. En effet, plus les grains deviennent fins, plus ils présentent ordinairement des formes anguleuses et en esquilles qui sont l'expression des cristaux et de leurs clivages. Malheureusement, on peut simplement constater (déplorer) qu'il n'existe pas de méthodes simples pour caractériser (numériquement)

5. Conclusion

Ces essais complémentaires sur les « Grès du Luxembourg » ont confirmé qu'il fallait chercher à séparer, pour ces matériaux, les « fines » et le « sable » vers 400 µm, et non pas à 63 ou 80 µm, en raison des propriétés physiques et d'état de surface des différents éléments. Les « fines » sont constituées de mono-grains quasi-sphériques, non poreux et lisses, et les grains plus gros d'agglomérats poreux, anguleux et rugueux, formés des grains plus petits cimentés par une matrice calcitique.

D'autre part, la technique de mesure des compacités élémentaires constitue un moyen supplémentaire de décryptage des structures granulaires, et elle mériterait de compléter la panoplie des essais de caractérisation normative des granulats. Cette méthode apporterait un moyen de caractérisation « en grand » de l'état de surface des grains, étroitement liée à l'histoire géologique de la roche.

6. Bibliographie

[BEN 70] BEN AIM R. Etude de la texture des empilements de grains. Application à la détermination de la perméabilité des mélanges binaires en régime moléculaire, intermédiaire, laminaire, Thèse d'état de l'Université de Nancy, 1970.

[CAQ 37] CAQUOT A. « Rôle des matériaux inertes dans le béton », *Mémoire de la Société des ingénieurs civils de France*, 1937, pp. 562-582, juillet-août.

[SED 94] SEDRAN T. & de LARRARD F. « RENE-LCPC : un logiciel pour optimiser la granularité des matériaux de génie civil », *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 194, nov.-déc. 1994, pp. 87-93.

[SED 99] SEDRAN T. Rhéologie et rhéométrie des bétons. Application à la formulation des bétons autonivelants, Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

[LAR 99] de LARRARD F. *Concrete mixture-proportioning. A scientific approach, E & FN SPON, London*, March 1999.

[LEC 99] LECOMTE A. & MECHLING J.-M. « Compacité des mélanges et propriétés des grains », *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 220, mars-avril 1999, pp. 21-34.

[MEC 99] MECHLING J.-M. Formulation de bétons courants avec les Grès du Luxembourg, Thèse de l'Université Henri-Poincaré Nancy 1, en préparation.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Dans cette conclusion, je vais revenir sur certains points qui me semblent importants.

Tout d'abord, je voudrais insister sur le fait que ces travaux ne sont qu'un apport aux recherches effectuées sur le thème de l'emploi des matériaux calcaires du Bajocien lorrain dans le domaine du BTP. Je souhaite qu'ils contribuent à l'établissement du guide annoncé pour l'emploi de ces matériaux dans notre région.

Le but de cette recherche était de montrer, et de valider par certains aspects, les possibilités d'emploi des calcaires lorrains réputés « tendres » dans les structures des chaussées, comme alternative économique aux ressources traditionnelles.

L'approche adoptée a consisté à faire tout d'abord certains rappels sur les notions de base relatives aux assises de chaussées et au contexte normatif français et européen, car elles fondent les méthodologies de laboratoire dont j'ai quotidiennement la pratique. Les calcaires lorrains sont pour certains écartés par ces documents et les pratiques associées, en raison de leurs performances mécaniques jugées trop faibles en général. Toutefois, l'expérience de l'autoroute A31, par exemple, montre que ces granulats donnent des résultats satisfaisants, en présence d'un liant hydraulique notamment, et pour un coût concurrentiel.

L'étude des données économiques de l'UNPG et de l'UNICEM permet de resituer, dans le contexte général, le marché des granulats routiers de la Lorraine. Plus de la moitié des matériaux est destiné à la route, ce qui justifie l'intérêt des calcaires, compte tenu de la raréfaction des ressources alluvionnaires. Cette évolution est en cours puisque l'on consomme aujourd'hui de plus en plus de calcaires, en compensation des matériaux siliceux. Notons que cette tendance n'est pas encore effective dans le domaine des bétons hydrauliques.

D'un point de vue géologique, les calcaires du Bajocien sont stratégiquement les plus intéressants, tant par leur situation géographique que par leur volumétrie. Cependant, ces calcaires présentent de nombreux faciès (dont les classifications sont rappelées dans le mémoire) ayant des variations spatiales multiples qui limitent la portée de toutes extrapolations. Un travail d'inventaire a permis de réaliser une banque de données

originales intégrant les caractéristiques intrinsèques des granulats issus des différents niveaux de cette formation. Elle est constituée des valeurs provenant de travaux antérieurs (Boëdec, 1981) et, surtout, du Laboratoire de Screg Est de Nancy. Ces données permettent de figurer la grande diversité des propriétés mécaniques, corollaire de la diversité des faciès. Elles couvrent les catégories C à F de la norme XP P 18-540 (article 7). Cette base de données trouvera certainement une application dans le cadre du marquage CE des granulats de construction, annoncé pour juin 2004.

Divers traitements statistiques des valeurs contenues dans cette base permettent de mieux caractériser la spécificité des calcaires lorrains, par comparaisons aux autres matériaux de la région et aux autres calcaires utilisés sur le territoire national (valeurs moyennes tirées de l'ouvrage de Arquié et Tourenq). A résistances à la compression égales, nos calcaires présentent de meilleures résistances aux chocs (essai Los Angeles), mais des résistances à l'attrition plus faibles (essai micro Deval) que la moyenne des calcaires nationaux. Certains gravillons sont ainsi « déclassés » en F. Toutefois, on peut s'interroger sur la pertinence du critère MDE lorsque les granulats sont traités avec un liant hydraulique, qui confère une certaine cohésion au produit (sauf peut être au droit des fissures ?). L'attrition invoquée au droit de celles-ci, a-t-elle encore un sens à l'heure où les assises hydrauliques sont systématiquement préfissurées avec des dispositifs isolants les abouts de dalles ? Dans ce cas, le coefficient Los Angeles serait prépondérant, ce qui expliquerait les bonnes performances mesurées sur des GTLH à base de calcaires « tendres » (MDE élevé), de catégorie G3 à G4 avec des dosages en liant courants.

Une série d'expérimentations simples sur les grains et les mélanges a permis d'aborder le problème de l'adhérence pâte-granulat, ainsi que le rôle des fines d'attrition sur la cinétique de durcissement. Elles montrent, une fois encore, que la nature du liant en présence des calcaires est déterminante, comme l'ont bien compris les cimentiers, à l'avantage des produits riches en laitier. Les fines d'attrition testées, qui contenaient une part non négligeable d'argiles et d'oxydes métalliques, pénalisent à court terme, mais pas à long terme, la résistance du liant routier.

Par comparaison à des travaux bibliographiques traitant de matériaux aux propriétés équivalentes, on montre la conduite à tenir pour limiter l'évolution granulaire au cours de la mise en œuvre des mélanges à base de granulats « tendres ». La formule la plus stable correspond à celle qui se positionne au centre du fuseau 1 de la norme NF P 98-116, objectif récurrent du formulateur.

La part la plus originale de ce travail est présentée dans trois publications qui traitent respectivement des coefficients de correspondance pour l'extrapolation des performances mécaniques des GTLH calcaires, des performances mécaniques des granulats calcaires au regard des mélanges traités durcis, et de la mesure des compacités granulaires élémentaires.

- La première s'appuie sur l'analyse des résultats d'un très grand nombre de performances mesurées sur des GTLH formulées au laboratoire Screg Est avec des granulats provenant du Grand Est de la France. Elle permet de proposer plus d'une vingtaine de coefficients de correspondance en fonction des granulats et des liants utilisés, en remplacement du seul coefficient proposé par le guide d'application pour chaque technique (GTLR, STLR et GC). Les granulats calcaires ont des coefficients de correspondance plus élevés qui traduisent une montée en résistance plus rapide. Tenir compte des coefficients initiaux de la norme conduit donc à surestimer les performances finales des produits. Par ailleurs, les essais de traction et de fendage réalisés ont permis de confirmer la pertinence du coefficient d'équivalence généralement admis : Rt directe $\approx$ 0,8 Rt fendage.
- La seconde croise les performances des mélanges utilisés précédemment avec les propriétés intrinsèques des gravillons calcaires contenues dans la base de données présentée dans ce mémoire. On constate que les performances des GTLH sont peu dépendantes des caractéristiques LA et MDE des gravillons calcaires, et que l'on atteint des performances satisfaisantes avec des matériaux classés F, contrairement aux spécifications normatives, en présence toutefois d'un liant adapté. La résistance à la traction de la roche serait par contre un critère plus pertinent pour sélectionner les granulats pouvant entrer dans les techniques de GTLH.
- La troisième publication concerne la mesure des compacités élémentaires des tranches granulaires, qui intègrent les propriétés morphologiques et d'état de surface des grains. Ce paramètre est déterminant pour la modélisation des structures granulaires et pour les calculs de formulations avec les outils associés déjà utilisés pour les bétons, outils qui pourraient être adaptés aux mélanges routiers traités ou non traités aux liants hydrauliques et/ou bitumineux.

L'ensemble de ces travaux permet également de proposer quelques consignes pour l'élaboration à la réalisation des ouvrages à base de granulats calcaires lorrains, de façon à valoriser au mieux ces ressources de substitution :

- Compte tenu des variations latérales et verticales de faciès, il faut éviter toutes extrapolations et interpolations des caractéristiques mécaniques intrinsèques mesurées localement sur les faciès calcaires du Bajocien lorrain.
- La plupart des granulats calcaires extraits dans ces formations, correctement élaborés, peuvent donner, après traitements appropriés, des produits couvrant toutes les gammes de classifications codifiées dans les normes NF P 98-113 et NF P 98-116 respectivement dédiées aux STLH et GTLH.
- Dans chacun des cas, une étude en laboratoire, selon les méthodologies des normes NF P 98-114 1 et 2, doit être réalisée.
- La mesure de la résistance à la traction de la roche doit être réalisée dans la mesure du possible, en complément des essais Los Angeles et Micro Deval, pour estimer les limites mécaniques des matériaux.
- L'estimation des performances normatives à 360 jours doit être faite en tenant compte des coefficients de correspondance proposés qui intègrent la nature chimique du granulat et du liant, sous peine d'une surévaluation des performances
- La granularité des mélanges, constitués d'au moins deux coupures calcaires, doit se situer de préférence au centre du fuseau 1 des GTLH (et au centre du fuseau pour les GNT), pour éviter une modification trop importante de la granularité durant la mise œuvre, et un éloignement des prévisions du laboratoire. Une composition trop sableuse sera peu affectée par le compactage, mais très sensible à de faibles variations hydriques. A l'inverse, une composition trop creuse sera plus propice à une évolution granulaire.

Le respect de ces consignes permet en pratique d'atteindre dans la majorité des cas les objectifs fixés, comme ce fut le cas par exemple pour la couche de fondation de l'autoroute A31 au sud de Toul (le plus gros chantier de référence de la Lorraine) où le concept

granulat donné + formulation adaptée = grave laitier normale

a été proposé. D'autres expériences réussies peuvent aussi être citées, comme le chantier de la liaison A 330 / A 31 au Sud de Nancy qui fait appel avec succès, en couche de fondation, à un STLH à base du sable calcaire à polypiers de Viterne.

Les résultats présentés ici ouvrent diverses perspectives de recherches et de synthèse. Il s'agirait notamment de conforter la base de données des propriétés des granulats, pour affiner la connaissance des gisements et la localisation des meilleures ressources. De même, il convient de compléter la validation des coefficients de correspondance utilisés pour les calculs à long terme, par l'étude d'autres natures de matériaux, puis de les faire évoluer, le cas échéant, au gré de l'apparition des nouveaux liants hydrauliques routiers. Par ailleurs, si les relations entre la résistance à la traction des roches et les performances de GTLH s'avèrent pertinentes, il faudrait valider cette nouvelle approche par d'autres essais. Ce serait alors un outil précieux pour évaluer rapidement le potentiel de nouveaux gisements. Enfin, le recours aux nouveaux outils de formulation des bétons pourrait s'avérer judicieux pour la formulation optimale des GTLH et des GNT, en remplacement des méthodes empiriques actuelles. Une recherche en ce domaine s'avère encore nécessaire.

Ces résultats et perspectives concourent tous à l'établissement d'un Guide d'emploi des ressources calcaires dans les assises routières en Lorraine.

S.C.D. - U.H.P. NANCY 1
BIBLIOTHÈQUE DES SCIENCES
Rue du Jardin Botanique - BP 11
54601 VILLERS-LES-NANCY Cédex

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

Nota : La bibliographie relative à ce mémoire est présentée par partie. Il en résulte donc qu'un même ouvrage peut faire l'objet d'une ou plusieurs références dans tout le document.

PARTIE 1

1 – 1 NOTION DE ROUTE ET DE STRUCTURE ROUTIERE

A-1 PEYRONNE C., CAROFF G., 1984. *Dimensionnement des chaussées* — Presse de l'école nationale des Ponts et Chaussées

A-2 SETRA, LCPC, décembre 1984. *Conception et dimensionnement des structures de chaussées – Guide technique –*

A-3 REVUE GENERALE DES ROUTES ET AERODROMES n° 823, décembre 2003.

A-4 MINISTERE DE L'URBANISME ET DU LOGEMENT / MINISTERE DES TRANSPORTS, 1982. *Reconnaissance géologique et géotechnique des tracés de routes et autoroute.* 111p.

A-5 SETRA, LCPC, 1998. *Réseau routier national – Catalogue des structures types de chaussées neuves – Notice d'utilisation -*

A-6 BATHIAS C., BAÏLON J.P., 1997. *La fatigue des matériaux et des structures (2ième édition)* – HERMES – 1997. 684 p.

A-7 SAUTEREY R. - Propos recueillis lors d'un entretien privé LCPC.

A-8 AFNOR, décembre 1992. *NF P 98-114-1 - Méthodologie d'étude en laboratoire des matériaux traités aux liants hydrauliques – Partie 1 – Graves traitées aux liants hydrauliques.*

A-9 AFNOR, décembre 1992. *NF P 98-114-2 - Méthodologie d'étude en laboratoire des matériaux traités aux liants hydrauliques – Partie 2 – Sables traités aux liants hydrauliques.*

1 – 2 CONTEXTE ECONOMIQUE DE LA LORRAINE

B-1 MINISTERE DE L'EQUIPEMENT DES TRANSPORTS ET DU LOGEMENT, 2001. *Rapport d'activité.*

1 – 3 LA ROUTE : GRANDE CONSOMMATRICE DE GRANULATS

C-1 UNICEM, 1997. Le marché des granulats en 1997 – 1997. Documents de travaux.

C-2 UNICEM / UNPG, 2002. *Le marché des granulats en 1997 / Annexe 3.* Documents de travaux.

C-3 TOURENQ C., ARQUIE G., 1989. *Granulats* –Presse de l'école nationale des Ponts et Chaussées. 717p.

C-4 ZENNIR A., 1996. *Bétons calcaires en Lorraine. Utilisation des granulats du bajocien de Viterne pour la formulation de bétons courants.* Thèse Université Henri Poincaré Nancy 1. 204 p.

C-5 LECONTE A., 1995. *Formulation de bétons courants avec les granulats calcaires de la carrière d'Attignéville et le CPJ45R/CEMII-B de Vicat à Xeuilley.* Rapport EGA 300/94

C-6 CAMUS J., CAUSERO L., 1984. *L'autoroute A31 – Section Toul – Montigny le Roy* - Laitiers de hauts fourneaux n° 55/1

C-7 DE LARRARD F., 2000. *Structures granulaires et formulation des bétons.* Presse de l'Ecole nationale des Ponts et Chaussées. 414 p.

1 – 4 SUBSTITUTION DES RESSOURCES ALLUVIONNAIRES

D-1 LECOMTE A., 2000. *Contribution à la valorisation des ressources minérales de la Lorraine et du Luxembourg* – HDR Université Henri Poincaré Nancy 1, décembre, 167 p., 11 annexes.

D-2 GEISLER J.L., 1995. *Optimisation de l'emploi des matériaux locaux dans les bassins de la Moselle et de la Sarre* - Thèse Université Henri Poincaré Nancy 1 n° 8804338

D-3 PRIMEL L., 1972. *Synthèses régionales des ressources en granulats de construction et de viabilité* – BLPC n° 58

D-4 JUMASHEV V.M., TOURENQ C., 1984. *Utilisation de granulats tendres dans les chaussées* — Bulletin de l'association internationale de géologie de l'ingénieur n° 30.

D-5 TOURENQ C., Le problème de l'utilisation des granulats hors spécification – LCPC.

D-6 FERREIRA L., BONDANT M., septembre 1999. *Rapport de synthèse bibliographique des travaux de l'association Materloc Calcaire* – APC Analyses.

D-7 LRPC DE NANCY, 18 juin 1998. *Réflexion sur la mise en œuvre d'un guide d'application des normes aux matériaux lorrains.*

D-8 UNPG, 1992. Texte reporté dans le document de synthèse « Rendez-vous techniques » du 20 septembre 1996 du LRPC de Nancy. *Extrait du guide d'utilisation des matériaux carbonatés du département de Meurthe et Moselle.*

D-9 VALENTIN J.M., 3 mars 1997. *Objet : Démarche de la valorisation des matériaux lorrains dans le génie civil.* LRPC de Nancy. Courrier.

D-10 DUPONT P., juillet 1996 - Texte reporté dans le document de synthèse « Rendez-vous techniques » du 20 septembre 1996 du LRPC de Nancy. *Note méthodologique sur l'emploi des « granulats locaux » en technique routière*– SETRA

D-11 SETRA, LCPC, décembre 1984. *Conception et dimensionnement des structures de chaussées – Guide technique –*

D-12 SETRA / LCPC, 2000, *Assises de chaussées – Guide d'application des normes pour le réseau national routier.*

1 – 5 CADRE NORMATIF ACTUEL

E-1 AFNOR, octobre 1997. *XP P 18-540, Granulats – Définitions, conformité, spécifications.*

E-2 AFNOR, février 2000. *NF P 98-116, Assises de chaussées – Graves traitées aux liants hydrauliques – Définitions – Composition – Classification.*

E-3 AFNOR, novembre 1991. *NF P 98-128, Assises de chaussées – Bétons compactés routiers et graves traitées aux liants hydrauliques et pouzzolaniques à hautes performances – Définitions – Composition – Classification.*

E-4 AFNOR, novembre 1994. *NF P 98-129, Assises de chaussées – Graves non traitées – Définitions – Composition – Classification.*

E-5 AFNOR mars 1999. *NF P 98-113, Assises de chaussées – Sables traités aux liants hydrauliques et pouzzolaniques – Définitions – Composition – Classification*

E-6 SETRA / LCPC, 2000, Assises de chaussées – *Guide d'application des normes pour le réseau national routier.*

1 – 6 PROJET D'OUVRAGE ET ETUDE EN LABORATOIRE

F-1 AFNOR, décembre 1992. *NF P 98-114-1 - Méthodologie d'étude en laboratoire des matériaux traités aux liants hydrauliques – Partie 1 – Graves traitées aux liants hydrauliques.*

F-2 AFNOR, novembre 1994. *NF P 98-114-2 - Méthodologie d'étude en laboratoire des matériaux traités aux liants hydrauliques – Partie 2 – Sables traités aux liants hydrauliques.*

F-3 AFNOR, décembre 1990. NF P 18-573 – *Granulats – Essai Los Angeles*

F-4 AFNOR, décembre 1990. NF P 18-572 – *Granulats – Essai d'usure micro-Deval.*

F-5 AFNOR, décembre 1990. NF P 18-555 – *Granulats – Mesure des masses volumiques, coefficient d'absorption et teneur en eau des sables.*

F-6 AFNOR, décembre 1990. NF P 18-554 – *Granulats – Mesure des masses volumiques, de la porosité, coefficient d'absorption et teneur en eau des gravillons et des cailloux..*

F-7 AFNOR, septembre 1990. NF P 18-560 – *Granulats – Analyse granulométrique par tamisage.*

F-8 AFNOR, septembre 1990. NF P 18-561 – *Granulats – Mesure du coefficient d'aplatissement*

F-9 AFNOR, février 2000. *NF P 98-116, Assises de chaussées – Graves traitées aux liants hydrauliques – Définitions – Composition – Classification.*

F-10 AFNOR, octobre 1999. *NF P 94-093, Sols : Reconnaissance et essais – Détermination des références de compactage d'un matériau – Essai Proctor normal – Essai Proctor modifié*

F-11 AFNOR, février 1999. *NF P 98-231-1, Essais relatifs aux chaussées – Comportement au compactage des matériaux autres que traités aux liants hydrocarbonés.*

F-12 AFNOR, avril 1992. *NF P 98-230-1, Essais relatifs aux chaussées – Préparation des matériaux traités aux liants hydrauliques ou non traités – Partie 1 : fabrication des éprouvettes par vibrocompression.*

F-13 AFNOR, septembre 1992. *NF P 98-232-2, Essais relatifs aux chaussées – Détermination des caractéristiques mécaniques des matériaux traités aux liants hydrauliques – Partie 2 : essai de traction directe sur graves et sables.*

F-14 AFNOR, février 2000. *NF P 98-116, Assises de chaussées – Graves traitées aux liants hydrauliques – Définitions – Composition – Classification.*

PARTIE 2

2- 1 NOTIONS DE ROCHES CALCAIRES

G - 1 POMEROL C., RENARD M., 1997. *Eléments de géologie - 11e édition* – Masson

G - 2 COJAN I.,RENARD M., 1997. Sédimentologie. Masson

G - 3 J. CASTAING J., GEISLER D., 1972. Contribution à l'étude sédimentologique du Bajocien de la région de Nancy - Thèse Université Henri Poincaré Nancy 1.

2- 2 LE BAJOCIEN LORRAIN

H - 1 BRGM, 1980. Synthèse géologique du bassin de Paris – Lexique des noms de formation – Mémoire du n° 103

H - 2 REMILLON A. et al., février 1988. Programme "Materloc". *Utilisation optimale des matériaux locaux. Projet national de recherches. CALCAIRES. Etude technico-économique d'orientation*

H - 3 FOUCAULT A., RAOULT J.F., 1995. Dictionnaire de géologie – 4ièmeédition – Masson

H - 4 SERVICE GEOLOGIQUE NATIONAL, 1996. *Carte de la France au millionième 6ième édition* – Edition BRGM

H - 5 ELMI S., BABIN C., 1994. *Histoire de la terre*. Masson

H - 6 HAGUENAUER B., HILLY J., 1979. *Guides géologiques régionaux. Lorraine Champagne* – Masson

H - 7 J. CASTAING J., GEISLER D., 1972. *Contribution à l'étude sédimentologique du Bajocien de la région de Nancy* - Thèse Université Henri Poincaré Nancy 1.

H - 8 BOËDEC P., 1981. *Matériaux de substitution : Valorisation des calcaires du Bajocien.* DEA de l'INPL.

H - 9 GEISLER J.L., 1995. Optimisation de l'emploi des matériaux locaux dans les bassins *de la Moselle et de la Sarre* - Thèse Université Henri Poincaré Nancy 1 n° 8804338

2- 3 GEOLOGIE ET CARACTERISTIQUES DES CALCAIRES DU BAJOCIEN LORRAIN

I - 1 HAGUENAUER B. La localisation et l'utilisation économique optimale des ressources carbonatées d'une région

I - 2 BOËDEC P., 1981. Matériaux de substitution : Valorisation des calcaires du Bajocien. DEA de l'INPL

I - 3 BRGM, 2000-2001. Catalogue des Publications – Editions BRGM

I - 4 ZENNIR A., 1996. Bétons calcaires en Lorraine. Utilisation des granulats du bajocien de Viterne pour la formulation de bétons courants. Thèse Université Henri Poincaré Nancy 1. 204 p

PARTIE 3

3 – 1 RELATION ENTRE LES PROPRIETES MECANIQUES DES ROCHES

J – 1 TOURENQ C., ARQUIE G., 1989. *Granulats* –Presse de l'école nationale des Ponts et Chaussées. 717p.

J – 2 BOËDEC P., 1981. Matériaux de substitution : Valorisation des calcaires du Bajocien. DEA de l'INPL.

3 – 2 ADHERENCE MORTIER HYDRAULIQUE - GRANULATS

K – 1 DE LARRARD F., 2000. *Structure granulaire et formulation des bétons*. Laboratoire central des Ponts et Chaussées – IST – 414 p.

K – 2 MASO J.C., 1982. *La liaison pâte granulats* dans *Le béton hydraulique* - Presse de l'école nationale des Ponts et Chaussées. 560p.

K – 3 VOIRIN J. 1998. *Contribution à l'étude des bétons de calcaires lorrains – Application au site de Viterne (54)* – DRD Université Henri Poincaré – Nancy I

K – 4 LECOMTE A. *Influence de la nature du ciment sur les propriétés de mortier calcaires.*

3 – 3 INFLUENCE DES FINES D'ATTRITION

L – 1 HAGUENAUER B. *La localisation et l'utilisation économique optimale des ressources carbonatées d'une région*

3 – 4 EVOLUTION GRANULAIRE DES MATERIAUX AU COMPACTAGE

M – 1 KHAY M . 1984. *Evolution des matériaux routiers au compactage* - numéro spécial Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées n° XIV

M – 2 GRIVEAUX B., ROBERT B. 1984. *Calcaires tendres en fondation de chaussée* - numéro spécial Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées n° XIV. (page 168)

M – 3 GARDEUX F., LOPES MONTEIRO P. 2000. *Utilisation de matériaux calcaires en techniques routières* – Document interne au laboratoire de Screg Est

GLOSSAIRE DE GEOLOGIE

GLOSSAIRE DE GEOLOGIE

Nota : les définitions proposées sont issues du dictionnaire de géologie de A. Foucault et J.F. Raoult. (4ième Edition. Masson. Février 1995), du Grand Larousse Universel (édition de 1989) et de divers sites Universitaires WEB

Affleurement Partie d'un terrain visible à la surface de la Terre. Il s'agit donc d'une intersection entre une formation géologique, un gisement avec la surface du sol. Un gisement qui affleure peut généralement être exploité, au moins en partie, à ciel ouvert.

Allochème Dans les roches carbonatées, désigne des éléments d'origine chimique ou biochimique formés dans le bassin au cours de la sédimentation et ayant subi un certain transport. On distingue les intraclastes, les oolites, les fossiles, les pellets. Adj : Allochimique

Alluvions Particule sédimentaire déposée par un cours d'eau. Les alluvions sont généralement constituées de galets, graviers et sables dans le lit et sur les berges des cours d'eau, et de limons silteux ou argileux dans les plaines d'inondations adjacentes. Le matériel transporté peut avoir subi des modifications plus ou moins importantes du fait de son transport.

Bioclastique Se dit d'une roche sédimentaire contenant une bonne proportion de bioclastes (Fossile entier ou en débris, in situ ou transporté contenu dans une roche. Il n'est jamais en position de vie).

Bioherme Masse rocheuse construite par des organismes de type récifal et aussi haute que large.

Biomicrite calcaire formé de bioclastes pris dans un ciment microcristallin

Biosparite calcaire formé de bioclastes pris dans un ciment essentiellement cristallin

Biostrome Masse rocheuse construite par des organismes récifaux et plus étendue que haute

Bryozoaire Groupe zoologique comprenant des organismes coloniaux et généralement constructeurs. Ce sont des animaux des mers chaudes et peu profondes. On dénombre actuellement près de 4000 espèces de colonies sédentaires qui peuvent être confondues avec des algues.

Calcarénite Roche sédimentaire formée d'arénites calcaires et à ciment calcaire qui peut être microcristallin ou spathique.

Clypeus ploti

Oursin fossile (photo : bajocien moyen – région de Nancy)

Coquillier Calcaire coquillier : roche renfermant des débris de coquilles

Cyanophycée Algue de couleur bleu-vert

Diaclase Fracture d'une roche ou d'une formation sans rejet entre les deux compartiments.

Diagenèse Processus physico biochimique affectant un dépôt sédimentaire et le transformant progressivement en roche cohérente (par exemple : transformation d'un sable en grès). Elle comporte en autres phases, les phénomènes de compaction, cimentation et des modification minéralogiques.

Dismicrite Roche carbonatée criblée de petites cavités à remplissage de calcite (calcaire « bird's eye »)

Entroques Nom usuel des articles discoïdes, pentagonaux ou circulaires qui composent les tiges des encrines (nom commun aux échinodermes fixés actuels ou fossiles de la classe des crinoïdes – lis de mer, ...)

Faciès Ensemble des caractères lithologiques et paléontologiques primaires observables dans une roche. Ensemble des caractères minéralogiques et structurant d'une roche.

Faille Discontinuité sub-plane de terrain selon laquelle s'est produit un déplacement relatif (horizontal ou vertical) des deux compartiments fracturés.

Foraminifère Protozoaire rhizopode généralement marin, libre ou fixé, dont le protoplasme se trouve protégé par une coquille (exemple de foraminifère fossile : miliole).

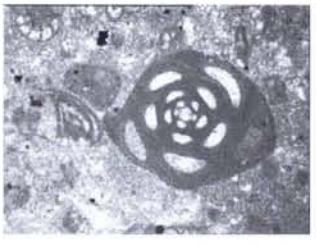
Intraclaste Roche constituée de particules arrachées à un dépôt déjà consolidé et mélangées à ce dernier.

Lumachelle Roche sédimentaire calcaire, peu cimentée, formée par accumulation de coquilles fossiles entières ou brisées.

Marne Roche sédimentaire à grain fin, très tendre dont les composants essentiels sont le carbonate de calcium (25 à 80 %) et l'argile.

Micrite Dans les roches calcaires, les grains sont souvent entourés par une phase calcaire microcristalline : la micrite. Elle correspond à une boue déposée en même temps que les grains. Cette boue est généralement produite par la désintégration des algues fixant le calcaire, l'érosion des bioconstructions par les organismes perforants et l'usure mécaniques des grains par l'agitation des algues; dans les lagons à tendance évaporitique, une précipitation purement chimique peut avoir lieu.

Miliole Foraminifères pluriloculaires



photographie d'une miliole (microscopie optique). © Lycée de l'Albanais

Nubéculaire Groupe de foraminifères proche des milioles, dont certaines espèces construisent des récifs.

Oolithe Ce nom permet d'imaginer les oolithes qui sont comparables en terme de taille comme de forme à des œufs de poisson. Il s'agit de petites sphères d'une taille comprise entre 0,5 et 2 mm.
Une oolithe est composée :

- d'un noyau : généralement un débris,
- un cortex : minces couches superposées souvent calcaire et parfois ferrugineux enveloppant le noyau.

Les oolithes se forment en milieu marin peu profond mais agité. Elles restent en suspension où les couches formant le cortex se mettent en place puis lorsqu'elles deviennent trop lourdes, elles se déposent sur le fond marin.

Organogène (adj.) synonyme de biologique

Pendage Angle entre une surface (couche par exemple) et un plan horizontal.

Polypier Squelette calcaire sécrété par certains polypes de cnidaires (embranchement zoologique formé d'individus à symétrie radiaire, composé d'une paroi à deux feuilles entourant une cavité gastrique s'ouvrant à l'extérieur par un orifice unique, entouré de tentacules)

Porphyre Toute roche magmatique montrant de grands cristaux de feldspath dispersés dans une pâte aphanitique (qui ne montre pas de cristaux discernables à l'œil nu).

Quartzite Roche siliceuse, compacte, à cassure conchoïdale lisse ou finement esquilleuse, en général claire et d'aspect gras. Un quartzite (n.m) est constitué de cristaux de quartz intimement soudés, souvent dentelés et engrenés.

Rhyolite Roche magmatique effusive (qui atteint la surface et se répand à l'état fondu : lave) riche en verre.

Rudiste Groupe de bivalves fixés et récifaux, à coquille épaisse, vivant dans les mers chaudes du Jurassique et du Crétacé.

Strate Synonyme de « couche »

Stromatolites Construction discoïde ou mamelonnée due à des cyanophycées (algues bleues). Répartition stratigraphique : Précambrien à actuel.

Stylolithe Structure en forme de colonnette s'interpénétrant au sein de roches calcaires ou marno-calcaires en dessinant des joints irréguliers. Ce sont des surfaces de dissolution sous pression.

Substratum Désigne ce sur quoi repose une formation géologique prise en référence.

Térébratule Brachiopode (groupe zoologique comprenant des individus enfermés dans une coquille bivalve à symétrie bilatérale, généralement fixé par un pédoncule)

Terrigène Se dit de tout élément figuré (fragment de roche, minéral,...) qui a été arraché à une terre émergée par l'érosion, ainsi qu'aux sédiments qui en sont constitués.

Travertin Synonyme de tuf calcaire. Roche sédimentaire calcaire continentale.

Tuf rhyolitique Rhyolite formée par accumulation de projections volcaniques en fragment de quelques millimètres.

S.C.D. - U.H.P. NANCY 1
BIBLIOTHÈQUE DES SCIENCES
Rue du Jardin Botanique - BP 11
54601 VILLERS-LES-NANCY Cédex

Monsieur **VOIRIN Jean**

DOCTORAT de l'UNIVERSITE HENRI POINCARE, NANCY 1

en GENIE CIVIL

VU, APPROUVÉ ET PERMIS D'IMPRIMER N°950

Nancy, le 07 juillet 2004

Le Président de l'Université

J.P. FINANCE

Université Henri Poincaré, Nancy I
24-30 rue Lionnois - B.P. 3069 - 54013 NANCY Cédex
Tél. : 03 83 68 20 00 - Fax : 03 83 68 21 00