Académie royale des Sciences d'Outre-Mer

Classe des Sciences Techniques Mémoires in-8°, Nouvelle série, tome XVIII, fasc. 5, Bruxelles, 1983

Caractéristiques géologiques et mécaniques des granulats

par

Philippe Vanden Eynde

Ingénieur civil des Constructions U.I.Lv. Titulaire du Certificat spécial en Géologie du Génie civil et Ingénieur de recherche à l'Université de Liège

Koninklijke Academie voor Overzeese Wetenschappen

Klasse voor Technische Wetenschappen Verhandelingen in-8°, Nieuwe reeks, boek XVIII, afl. 5, Brussel, 1983





Académie royale des Sciences d'Outre-Mer

Classe des Sciences Techniques Mémoires in-8°, Nouvelle série, tome XVIII, fasc. 5, Bruxelles, 1983

Caractéristiques géologiques et mécaniques des granulats

par

Philippe Vanden Eynde

Ingénieur civil des Constructions U.I.Lv. Titulaire du Certificat spécial en Géologie du Génie civil et Ingénieur de recherche à l'Université de Liège

Koninklijke Academie voor Overzeese Wetenschappen

Klasse voor Technische Wetenschappen Verhandelingen in-8°, Nieuwe reeks, boek XVIII, afl. 5, Brussel, 1983 Mémoire présenté en réponse à la 6 question du Concours annuel 1977, à savoir : On demande une contribution originale à la recherche des relations entre les caractéristiques géologiques (minéralogie, texture, structure) des matériaux rocheux et les résultats des essais mécaniques destinés à déterminer quantitativement leur aptitude à être utilisés comme granulats en génie civil (béton, revêtements routiers, etc.) Il a été couronné par la Classe des Sciences techniques en sa séance du 25 novembre 1977.

(Rapporteurs: MM. G. HEYLBROECK, B. STEENSTRA et R. VAN GANSE)

Nos remerciements les plus vifs vont à Monsieur le Professeur Calembert qui fut le guide attentif et persévérant de cette recherche. Que tous ceux qui ont collaboré aimablement à ce travail trouvent ici l'expression de ma gratitude, spécialement l'équipe des Laboratoires de Géologie générale et appliquée de l'Université de Liège, parmi laquelle Christian Schroeder mérite une marque spéciale de ma reconnaissance.



I. GENERALITES

1. LES QUALITÉS EXIGÉES DES GRANULATS POUR TRAVAUX DE GÉNIE CIVIL.

En génie civil, les granulats entrent dans la composition de trois types de matériaux. Associés au mortier de ciment, ils constituent un conglomérat artificiel (le béton) qui présente l'avantage de prendre toutes les formes géométriques désirables. Combinés au mortier asphaltique, ils sont utilisé en technique routière sous forme de «béton noir» ou d'enduit superficiel. Additionnés d'une quantité de liant (ciment, bitume, laitier de haut fourneau) faible ou nulle, ils forment des assises de fondation parmi lesquelles on peut citer le ballast de chemin de fer et les couches inférieures des routes. A cette dernière catégorie d'assemblages, se rattachent les bétons naturels obtenus à partir des latérites et fréquemment utilisés dans les pays tropicaux avec un succès remarquable. Mises en œuvre sous forme d'agrégats, elles jouent les rôles simultanés de granulat et de liant. Leur transformation en béton naturel procède de phénomènes physico-chimiques (compactage, recristallisation...). L'étude des latérites s'avère du plus haut intérêt mais suit des voies toutes différentes de celles dont on parlera ici.

A ces trois types de matériaux, on demande surtout des performances mécaniques, et ce dans deux domaines. Dans tous les cas, la masse du matériau doit pouvoir résister sans rupture aux sollicitations spécifiques de son utilisation; dans le cas des revêtements routiers, la surface du matériau doit pouvoir résister à l'arrachement de ses éléments et garder dans le temps ses propriétés de planéité et de rugosité.

Pour satisfaire ces exigences, le matériau global doit avoir des qualités suffisantes qui sont subordonnées à celles des éléments constitutifs (granulats, liant, acier éventuel, ...) et celles de leur assemblage (proportions - adhésivité).

Aux granulats en particulier, on demandera dans chaque cas certaines des caractéristiques qui suivent. Les premières sont d'ordre purement géométrique, les autres intéressent aussi le matériau rocheux dont les granulats sont issus.

Dans la première catégorie se rangent la GRANULOMETRIE, la FORME, l'ANGULARITE, la PROPRETE. Les exigences de gra-

nulométrie ont pour but d'obtenir une bonne compacité par un dosage judicieux et une macrorugosité de surface pour les revêtements routiers. Les exigences de forme éliminent les pierres plates ou longues dont la géométrie est défavorable à la résistance mécanique. L'angularité peut être souhaitée en surface, où elle contribue à la macrorugosité du revêtement, ou dans la masse des assises traitées ou non pour lesquelles elle augmente l'angle de frottement interne. Pour le béton par contre, on cherchera plutôt des graviers roulés: les arêtes vives risquent de poinçonner la matrice de ciment. La propreté enfin s'exprime par la quantité d'éléments fins, de diamètre inférieur par exemple à 7 microns, qui accompagnent les granulats. Elle a une importance capitale dans l'adhésivité des granulats au liant.

La seconde série de caractéristiques concerne la résistance des granulats à divers facteurs des domaines physique, chimique ou mécanique. Les actions physiques désignent des conditions de température et d'humidité qui peuvent altérer la résistance mécanique des granulats (ESSAI DE GEL, DEVAL HUMIDE par rapport au DEVAL SEC) ou faire gonfler les éléments fins (INDICE DE PLASTICITÉ des fines, EQUIVALENT DE SABLE). Les actions chimiques viennent du ciment (REACTIONS ALCALI-SILICE et ALCALI-CARBONATES) et des solutions aqueuses. Pour y répondre, on limite la TENEUR EN MATIÈRES ORGANIQUES et éventuellement la TENEUR EN CARBONATES (perte au feu). Enfin, les actions mécaniques peuvent être très diverses et sont envisagées principalement dans le domaine routier. Pour les bétons utilisés ailleurs, on se contente le plus souvent d'exiger un type rocheux, sain et non schiteux, tel que sa résistance soit supérieure à celle du ciment. Il est clair que dans ce cas, c'est la résistance du ciment qui conditionne celle du matériau global. En constructions routières, on envisage la résistance à un effort statique (COMPRESSION STATIQUE), la résistance au choc (LOS ANGELES, FRAGMENTATION DYNA-MIQUE), la résistance à l'attrition des pierrailles entre elles (DEVAL, MICRODEVAL), la résistance à l'usure (DORRY) et au polissage (CPA). Les exigences sont d'autant plus fortes que le granulat est situé plus près de la surface où peuvent régner des états de contrainte terribles au passage des véhicules qui ont tendance à fragmenter, arracher, user et polir les gravillons.

Nous avons ainsi passé en revue toutes les caractéristiques des granulats qui intéressent le technicien de la construction. Elles sont reprises au tableau I avec les paramètres qui les mesurent et les secteurs où elles sont exigées.

Dans le domaine particulier des résistances mécaniques que nous avons examiné en dernier lieu, les critères sont empiriques, variables

Tableau I: Caractéristiques exigées des granulats pour ouvrages de génie civil

Type	Genre	Paramètre mesuré	Référence	Béton de ciment	+ liant noir	assise (route)
	1. dimensions	calibre courbe granulométrique	NBN 329 NBN 329	0	0	0
. _K IÓNES	2. forme	indice de forme coeff. d'applatissement proportion de pierres plates	NBN 329 LCPC NBN 329	0	0	0
CÉOMÉT	3. angularité	indice de concassage rapport de corcassage proportion de pierres rondes	LCPC LCPC NBN 329	0	0	0
	4. propreté	teneur en filler teneur en impalpables	NBN 589 NBN 589	0	0	
ONES sure	5. sensibilité au gel	essai de gel par Los Angeles	LCPC	0		0
DHAZIĆ	6. sensibilité à l'eau	indice de plasticité des fins équivalent de sable Deval humide/Deval sec	LCPC NBN 589 LCPC	0	0	0
agents	7. eaux agressives	teneur en matières organiques perte au feu teneur en chaux/hallogénure	NBN 589 Type 108 NBN 329	0	0	0
CHIN snx	8. ciment	réaction alcali-silice réaction alcali-carbonates	ASTM ASTM	0		
IOUES gents	9. fragmentation	compression statique Los Angeles fragmentation dynamique	type 108 LCPC BS 312		0	0
MÉCAN	10. attrition polissage usure	Dv Deval et microdeval CPA coeff, de polissage accéléré U sur meule Dorry	LCPC BS 312	CPA	CPA Dv U	Dv

Résistance

Résistance

Résistance

d'un pays à l'autre dans de très larges limites, périodiquement remis en question et modifiés. Ils sont basés sur des essais souvent longs et coûteux, néanmoins incapables de reproduire avec certitude les sollicitations complexes auxquelles sont soumis les granulats.

Dans ces conditions, il paraît intéressant de rapprocher les caractéristiques pratiques examinées ci-dessus des propriétés intrinsèques des granulats. C'est à l'échelle microscopique que réagit la roche aux sollicitations physiques, chimiques, mécaniques qui s'appliquent à elle, c'est à cette échelle qu'il faut chercher les raisons de son comportement. Dans cette optique, on souhaite expliquer et même prévoir les résultats d'essais à partir de l'analyse des caractéristiques géologiques des granulats.

2. LES CARACTÉRISTIQUES INTRINSÈQUES DES GRANULATS

Les caractéristiques intrinsèques des granulats peuvent se grouper en deux classes: les *propriétés externes* qui tiennent à la géométrie macroscopique des granulats et les *propriétés internes* qui concernent le «tissu» du matériau rocheux.

Les propriétés externes des granulats sont leur granulométrie, leur forme, leur angularité, leur propreté. Les propriétés internes sont la nature, la texture et la microstructure de la roche. La NATURE de la roche s'exprime par sa composition minéralogique qui comprend l'énumération des minéraux présents et de leurs quantités relatives. La TEXTURE définit l'aspect d'une roche d'après la grandeur, la forme et le mode d'arrangement des éléments cristallins tels qu'on les observe au microscope. La MICROSTRUCTURE désigne la discontinuité du matériau c'est-à-dire la disposition des pores (vides à 3 dimensions semblables) et des fissures (vides à 2 dimensions importantes par rapport à la troisième).

Les propriétés internes dépendent surtout des caractéristiques de la roche en place et les propriétés externes sont avant tout tributaires du traitement de la roche qui aboutit à la production des concassés. Cependant, il existe des interventions entre ces deux types de propriétés. Les propriétés externes sont influencées par le matériau rocheux. Par exemple, la forme des granulats peut dériver de la structure massive, stratoïde ou schistoïde de la roche en place, l'angularité est influencée par la minéralogie (cassure conchoïdale du silex) de même que la propreté (certaines roches produisent spontanément des fines par altération superficielle rapide). D'autre part, la microfissuration, propriété interne, peut augmenter lors du concassage. On ne peut

donc pas décrire exactement toutes les caractéristiques internes des granulats à partir d'observations géologiques des gisements comme on ne peut pas pressentir avec précision les caractéristiques géométriques des granulats à partir de l'observation des installations de concassage.

Attachons-nous à dégager les relations qui lient les caractéristiques du type génie civil aux propriétés intrinsèques du matériau. Les caractéristiques géométriques sont identiques aux propriétés externes qui dépendent surtout de l'installation de traitement mais aussi de la géologie du gisement. On doit se contenter de les apprécier par les méthodes habituelles de génie civil (tamisage, pied à coulisse, sédimentométrie, observation visuelle des faces de concassage et des arêtes).

La résistance aux agents physiques ne dépend que des propriétés internes des granulats. En ce qui concerne la gélivité, la microstructure est le facteur dominant (R. LHERMITE, 1971), que les vides soient capillaires ou macroscopiques, du type «pores» ou du type «fissures». L'effet destructeur de la glace ne peut se produire que si l'eau peut y pénétrer. Cette pénétration n'est possible que si la quantité, la dimension et l'interconnexion des pores s'y prêtent. Dans ce cas, la tenue au gel est conditionnée par un certain pourcentage de remplissage des vides. Si ce degré de remplissage est dépassé, le volume des vides devient insuffisant pour une expansion libre de la glace, la matière pierreuse est gélive (figure 1).

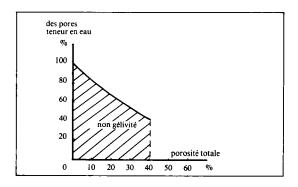


Figure 1. - Gélivité des roches.

D'après ARCHIMBAUD et TOURENQ (1971), le seuil de remplissage des vides communicants qui détermine la gélivité est de l'ordre de 85% (60% si la roche est très poreuse n>30%). En pratique, la

teneur en eau des granulats routiers dépasse toujours cette valeur. Dans ce cas, la gélivité dépend donc de la porosité en volume et de la dimension des vides. En effet, celle-ci influence la température de congélation de l'eau. Le phénomène de surfusion est tel que pour des pores de 0,10 microns l'eau gèle à -6 °C et que pour des pores de 0,007 microns, elle ne gèle pas encore à -38 °C (f

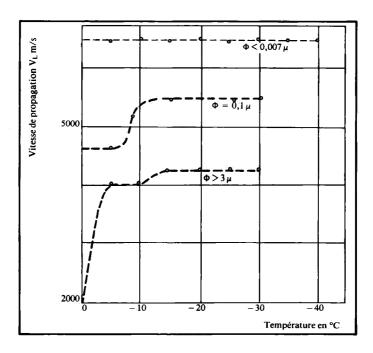


Figure 2: Augmentation de la vitesse de propagation des ondes longitudinales en fonction de la baisse de température pour 3 roches à dimensions de pores différent.

Les mêmes auteurs (1974) estiment que sous un seuil de porosité de 8%, la roche peut être déclarée non gélive, elle absorbe par élasticité la déformation provoquée par la transformation de l'eau en glace. D'après ces informations, il serait intéressant de pouvoir tracer une courbe limite expérimentale du domaine de non gélivité dans un diagramme porosité - dimension des vides pour une teneur en eau proche de la saturation et une température adaptée à la région concernée.

La résistance à l'action physique de l'eau dépend de la porosité qui lui permet de s'introduire dans le matériau et de la nature de la roche. En particulier, les mesures d'indice de plasticité et d'équivalent de sable effectuées sur les éléments fins sont représentatifs de la nature des argiles que contient le matériau rocheux. La figure 3 (A. LE ROUX, 1972) montre comment se groupent les échantillons d'une même famille minéralogique dans un diagramme indice de plasticité — limite de liquidité.

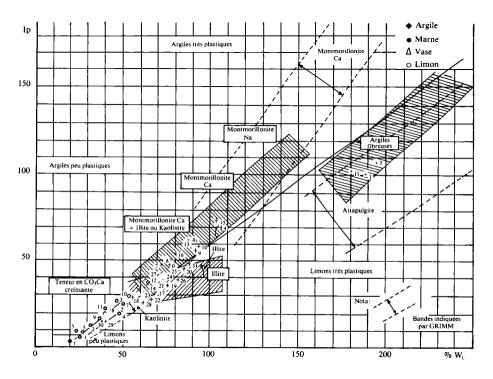


Figure 3: Relation entre l'indice de plasticité et la limite de liquidité.

Les argiles fibreuses se regroupent dans la zone des plus fortes valeurs de la limite de liquidité. Pour certains matériaux, la tendance montmorillonitique croissante se manifeste par une augmentation rapide de \mathbf{w}_1 et \mathbf{I}_p . Lorsque les montmorillonites sont saturées par du sodium, \mathbf{w}_1 et \mathbf{I}_p sont beaucoup plus élevées que pour les mêmes argiles saturées par du calcium. Une troisième zone apparaît nettement, qui regroupe les matériaux à illite dominante.

La résistance aux agents chimiques est fonction de la nature de la roche et de sa microstructure qui permet à l'eau d'y pénétrer. Dans le domaine des réactions granulat — eau avec matières en solution, on sera attentif à la présence des minéraux altérables. Les feldspaths par exemple peuvent être sujets à l'altération en présence d'eau suivant les conditions d'ambiance. Dans les climats chauds, la décomposition peut être rapide. Les matières organiques sont oxydables et hautement défavorables (débris animaux et végétaux, bois, charbon, lignite,...). Les carbonates sont solubles. On souhaite souvent limiter leur teneur. Si on considère les réactions granulat — ciment, divers minéraux se révèlent nuisibles: les impuretés de nature organique, les sels qui interviennent en pays désertiques sous forme d'évaporites, les métaux et leurs oxydes (de fer, de zinc), les sulfures (pyrite) et les sulfates (gypse) qui réagissent avec les aluminates du ciment pour former le sel de Candlot. En outre, certaines roches réagissent avec les alcalis présents dans le ciment. C'est le cas de certaines roches siliceuses qui contiennent de l'opale ou de la calcédoine et produisent en présence du ciment des gels de silice qui gonflent par absorption d'eau. La présence de la silice réactive peut être décelée par un examen pétrographique (R. MIELENZ, 1954). C'est le cas aussi de certains calcaires dolomitiques où la dolomie donne avec les alcalis une réaction expansive. La vitesse de réaction passe par un maximum lorsque la proportion de calcite est égale à celle de la dolomite (R. L'HERMITE, 1971).

Il reste à examiner le cas de la résistance des granulats aux divers efforts mécaniques. Les principaux essais mécaniques sont décrits à l'Annexe I. Ici interviennent les propriétés internes et externes. L'influence des propriétés externes est faible mais réelle dans certains essais. Par exemple, la forme des granulats conditionne les résultats des essais de choc (Los Angeles, fragmentation dynamique) car aiguilles et plats sont très fragiles. L'angularité à moins d'importance. Dans l'essai Deval par contre, la dégradation se marque par l'usure des arêtes et c'est l'angularité, bien plus que la forme qui importe. Les propriétés internes sont toutes importantes. La nature de la roche est un facteur capital: chacun sait que les quartzites sont en général plus résistants que les calcaires. La texture joue elle aussi

un rôle important: il est bien connu que les roches à grain fin sont plus résistantes, au choc par exemple, que les roches à grain grossier. On sait aussi (C. SCHROEDER, 1975) qu'une disposition quartzitique des grains d'un squelette est plus favorable qu'une texture réticulée ou empâtée si la résistance du ciment ou de la matrice est moindre que celle du squelette. Enfin, la structure de la roche est importante: les granulats ont une résistance d'autant meilleure qu'ils sont plus continus. On voit donc que pour évaluer les qualités mécaniques des granulats, il faudra envisager tout à la fois leur nature, leur texture, leur structure, leurs caractéristiques géométriques. La figure 4 résume en diagramme les relations énumérées ci-avant.

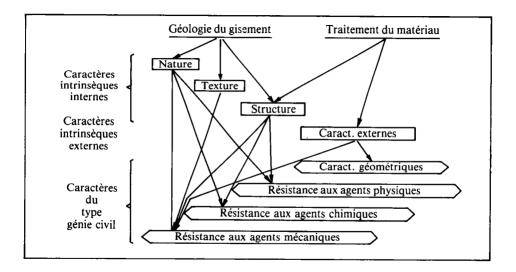


Figure 4: Relations entre caractéristiques intrinsèques et de génie civil.

II. PROPRIETES DES MATERIAUX ROCHEUX ET PERFORMANCES MECANIQUES

Le premier chapitre a montré que les caractéristiques mécaniques des matériaux rocheux dépendaient des propriétés intrinsèques internes des agrégats ainsi que des caractéristiques géométriques des éléments testés.

Le second chapitre s'attache à développer, au stade actuel des connaissances, les relations qui lient les paramètres élastiques et mécaniques aux propriétés internes des milieux rocheux.

Un premier paragraphe est consacré aux caractéristiques des cristaux qui régissent le comportement mécanique des roches. Les paragraphes suivants étudient les assemblages polycristallins et déduisent des lois de la mécanique des roches d'après leur nature, leur texture et leur structure.

1. PROPRIÉTÉS DES CRISTAUX

Les matériaux rocheux sont des agrégats de minéraux le plus généralement cristallins. Le modèle communément choisi en mécanique des roches considère le minéral comme unité, sans descendre à l'échelle infracristalline. On estime généralement que les propriétés d'un minéral sont identiques d'un cristal à l'autre. Nous définissons ici ces propriétés et nous discutons leur variabilité.

a) «Nature, texture, structure» cristallines

A l'échelle du réseau cristallin, les propriétés peuvent être rangées sous les étiquettes «nature, texture, structure» comme on le fait à l'échelle de l'agrégat polycristallin.

La nature des cristaux s'exprime par celle des atomes constitutifs reprise dans la formule chimique du minéral.

L'arrangement périodique des atomes dans l'espace peut être considéré comme la texture des cristaux.

Les différents défauts qui détruisent localement la périodicité cristalline ainsi que les plans de faiblesse (clivages) forment la structure.

Les propriétés mécaniques des minéraux telles que dureté, caractéristiques élastiques, plastiques et résistance à la rupture dérivent de ces trois facteurs.

Nature (composition chimique) et texture (système cristallographique) des minéraux les plus courants des roches sédimentaires figurent au tableau II.

Parmi les **défauts** dans l'édifice cristallin, certains se manifestent à l'échelle du réseau (défauts linéaires et ponctuels), d'autres à l'échelle du cristal (cavités primaires et défauts de composition).

Les défauts linéaires du réseau sont les dislocations.

Si on imagine une coupure dans un cristal selon un demi-plan, suivie d'un déplacement relatif des deux lèvres ainsi formées, la partie de cristal modifiée est séparée de la partie inchangée par une ligne qui est appelée «ligne de dislocation». Cette ligne se referme sur ellemême ou aboutit à une autre imperfection telle que surface extérieure ou joint de grain. Deux types simples de dislocations rectilignes présentent un intérêt particulier:

— les dislocations «coin» dans lesquelles la limite entre la partie glissée du cristal et l'autre restée immobile est perpendiculaire à la direction de glissement. La déformation du réseau est alors identique à celle que produirait l'introduction d'un demi-plan réticulaire supplémentaire dans le réseau (figure 5)

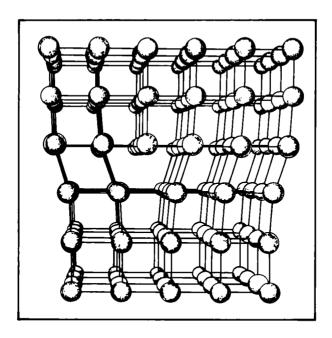


Figure 5: dislocation - coin

 les dislocations «vis» dans lesquelles cette limite est parallèle à la direction de glissement. Les plans atomiques se trouvent alors transformés en une surface hélicoïdale.

Les dislocations sont présentes dans tous les cristaux naturels. D'après les études de I. HANKE, 1961 il y aurait, dans un monocristal de calcite, de 10² à 10⁴ dislocations par cm². Dans les agrégats, leur densité varie en fonction de la taille et du degré de perfection des cristaux.

Les dislocations provoquent une augmentation locale de l'énergie du réseau qui favorise la concentration des contraintes. Elles interviennent dans la déformation par leur mobilité; de très faibles forces, probablement inférieures à 10⁵ dynes/cm² [M. d'ALBISSIN et C. TOURENQ, 1976] suffisent à les déplacer dans un plan de glissement. Ce déplacement entraîne un glissement des plans réticulaires. En l'absence de dislocations, des forces considérables devraient être déployées pour obtenir un tel glissement. La présence d'arcs de dislocation d'une certaine longueur, mobiles dans un plan de glissement, peut conduire à une multiplication des boucles de dislocation qui explique les faibles limites élastiques mesurées.

Les défauts ponctuels se situent au niveau des atomes constitutifs du réseau. Ce sont les *impuretés* et les *lacunes*.

Des ions d'une espèce normalement absente dans le cristal pur peuvent soit remplacer un ion du cristal hôte, soit se trouver en position interstitielle. La substitution est possible entre ions de diamètres différents. Les ions de diamètre inférieur sont incorporés plus facilement. La présence des ions de diamètre supérieur est possible mais crée localement une dilatation du réseau, donc un déséquilibre énergétique du cristal. Lorsque celui-ci est soumis à des contraintes, ils peuvent gêner les glissements sur les plans réticulaires.

Des ions peuvent se placer en position interstitielle, c'est-à-dire entre les atomes normaux du réseau, ce qui entraîne une certaine dilatation de la maille cristalline. Une contraction de la maille se produit par l'absence d'un atome normal du réseau. Il s'ensuit une affinité entre intersticiels, lacunes et dislocations-coins. En effet, une fraction du réseau affecté par une dislocation-coin est en compression alors que l'autre fraction est dilatée. Par suite, les intersticiels ont tendance à venir combler les zones dilatées alors que les lacunes surviennent dans les zones contractées.

Par ailleurs, des précipités remplacent parfois une portion de matrice ayant non pas le même nombre d'atomes mais le même volume. Ils se sont mis en place par diffusion et constituent souvent des obstacles au glissement des dislocations qui viennent s'empiler à leur voisinage. Il en résulte en certain durcissement du cristal.

Les défauts à l'échelle du cristal sont de deux types : cavités primaires et défauts de composition.

On observe dans certains cristaux des cavités dont le nombre peut parfois s'exprimer en dizaines de millions par mm³. Elles sont occupées par des inclusions liquides primaires ou par des inclusions épigénétiques. Ces cavités sont des lieux de concentration des contraintes et jouent probablement un rôle dans la déformation des roches.

Les défauts de composition concernent l'inclusion de particules peu déformables dans un minéral de plus grande dimension. Elles sont souvent à l'origine de microcraquelures ou de microdéformations localisées.

Il est clair que l'exploration de l'univers infracristallin dans le domaine mécanique en est encore à ses premiers pas. On se trouve donc réduit à négliger le rôle joué par les éléments de cet ordre. Nous considérerons donc que tous les cristaux d'un même minéral, pour autant qu'ils apparaissent sains sous le microscope, ont des capacités mécaniques et élastiques identiques. Néanmoins, cette incursion à une échelle inférieure nous éclaire un peu sur la diversité des phénomènes naturels, nous rappelle la précarité des résultats de la mécanique des roches et ouvre des horizons pour l'explication des phénomènes incontrôlés jusqu'ici.

Un autre élément structural important au point de vue mécanique est le *clivage*. Un plan de clivage est un plan de faiblesse suivant lequel la cassure se produit préférentiellement. Les plans de clivage sont souvent les plus importants du réseau cristallin, c'est-à-dire ceux dont la densité réticulaire est la plus grande et qui sont donc les plus distants les uns des autres. Dans les matières amorphes et les cristaux sans clivages, l'absence de direction privilégiée produit une *cassure conchoïdale*. L'énergie superficielle spécifique d'un minéral est l'énergie nécessaire pour rompre les liaisons atomiques suivant une surface unitaire, elle vaut 2.500 erg/cm² pour le quartz et 230 erg/cm² pour la calcite.

b) Le diagramme contrainte - déformation du cristal

Si on considère un monocristal soumis à un système de contraintes cylindriques, on observe, sur la courbe effort-déformation, une zone de comportement élastique suivie d'une phase plastique qui se poursuit jusqu'à la rupture.

La phase élastique du diagramme correspond à une simple modification des distances interatomiques. En l'absence de toute contrainte, l'espacement des atomes correspond à l'énergie potentielle minimale du réseau. Après relâchement des contraintes, les atomes reprennent leur position initiale.

Si le cristal contient des boucles de dislocations ancrées à leurs extrémités, celles-ci se courbent sous l'influence d'une contrainte extérieure et reviennent à leur disposition initiale après disparition des contraintes. Il en résulte une diminution du module d'élasticité.

Lors de la phase plastique du diagramme, divers mécanismes interviennent: les dislocations, les macles et les glissements intracristallins, la flexion.

Les macles et les glissements intracristallins se produisent sans changement de volume et sont possibles suivant des plans dont la localisation est liée à l'intensité des forces de liaison atomique. Celleci dépend de la nature des plans structuraux et de leur distance.

La macle mécanique est un glissement simple qui se produit sur des plans réticulaires adjacents par l'intermédiaire de dislocations imparfaites et de fautes d'empilement. La disposition des atomes dans la zone maclée devient symétrique de celle qui existe dans le cristal non maclé.

Lors des glissements intracristallins, les mouvements relatifs des atomes ne peuvent se produire que par un ou plusieurs sauts d'une distance interatomique. La déformation a donc un caractère discontinu. Elle ne se produit pas en bloc mais débute dans une région limitée d'un plan cristallographique dense, à partir de laquelle elle se propage dans une direction déterminée également par la structure de la maille cristalline. Ce glissement résulte du déplacement de défauts linéaires, dislocations «coin» ou «vis», dans leur plan de coupure. Il peut parfois être observé au microscope sous forme de bandes ou de lignes fines de glissement.

Certains cristaux sont soumis à des efforts de flexion qui provoquent un réarrangement des dislocations aboutissant à des déformations de cisaillement qui se produisent dans les plans de glissement. Le quartz répond le plus souvent à une sollicitation mécanique en se courbant suivant un mécanisme mal connu. Cette flexion se traduit au microscope par une extinction roulante.

La surface de **rupture** dans un cristal peut être un plan de clivage ou être quelconque, suivant la structure de la maille cristalline, l'orientation de la contrainte principale maximum, l'intensité des forces de liaison interatomiques et la densité des défauts de structure. C. TOURENQ et A. DENIS (1970) ont observé des ruptures en traction de feldspaths totalement indépendantes des plans de clivage. Certaines ruptures correspondent à des surfaces de cohésion plus faible telles que des plans de fissuration par contraction thermique.

c) Caractéristiques quantitatives liées à la NATURE des minéraux Les caractéristiques des cristaux mesurées en laboratoire sont la

dureté et les propriétés élastiques (module d'élasticité E, coefficient de Poisson ν , vitesse des ondes sismiques longitudinales V_1 et transversales V_t - voir annexe I). Dans chaque cas, on retient la valeur moyenne, les cristaux étant anisotropes vis-à-vis de ces propriétés.

ALEXANDROV et al. (1966) ont déterminé les caractéristiques E, ν , V_1 , V_1 de 57 minéraux différents.

C. TOURENQ (1966) a établi une classification des minéraux d'après leur *dureté Vickers* dv. Cette classification suit fidèlement l'échelle classique de Mohs.

La dureté est à rapprocher de la plasticité du cristal. En effet, les techniques de mesure de la dureté font appel à la capacité qu'a le cristal de se laisser entamer par un corps dur qui provoque une déformation plastique très localisée de la surface. Elle est intimement liée à la structure cristalline et varie, pour un même minéral, suivant l'orientation des plans réticulaires et, pour un plan donné, suivant les directions.

M.E. BOGISLAVSKI et C.A. UBKO, 1969 puis D. FOURMAINTRAUX, 1970, ont montré que, pour une même famille minéralogique, la dureté Vickers varie dans le même sens que les propriétés élastiques. Elle est donc une méthode facile d'évaluer ces dernières.

Le tableau II fournit les caractéristiques importantes au point de vue de la mécanique des roches, des minéraux les plus courants.

TABLEAU II: Caractéristiques des minéraux les plus courants

Minéral	Formules chimiques (nature)	Système cristallo- graphique (texture)	Clivages (structure)	E (t/cm ²)	ا د	V _I (km/sec)	V _t .	D _v kg/mm ²
Quartz	Si O ₂	rhomboédrique	aucun (cassure conchoïdale)	964	80,0	6,03	4,11	1280
Feldspaths	- potassiques KAISi ₃ O ₈ or those - plagioclases CaAl ₂ Si ₂ O ₈ anorthite	monoclinique tricliniques	deux clivages dont un parfait	672 808	0,28	5,69	3,26	720 650-750
Calcite Dolomite	Ca CO ₃ Ca Mg (CO ₃) ₂	rhomboédrique rhomboédrique	une direction de clivage parfait	810	0,28	6,66	3,39	110
- bla Micas KA Micas noi KF	blancs (alcalins) muscovite KAl ₂ (Si ₃ Al) O ₁₀ (CH, F) ₂ noirs (magnésiens) biotites KFE ₃ Al Si ₃ 0 ₁₀ (F, OH) ₂ K (Mg, Fe) ₃ Al Si ₃ 0 ₁₀ (F, OH) ₂	monocliniques	une direction de clivage très par- fait d'où un débi- tage en mInces lamelles	969	0,25	5,81	3,36	8 8
Argiles	silicates hydratės d'alumine	monocliniques	voir micas					
Pyrite	Fe S ₂	cubique	aucun		:	,		1050
Pyroxènes	(Ca Mg Fe) Si O3 augite	monocliniques	clivages nets à	1437	0,24	7,20	4,17	059
Amphiboles	(Mg Ca Fe) Si O ₃	monocliniques	clivages parfaits à	1288	0,28	7,21	3,99	730
Olivine	(Mg Fe) ₂ Si O ₄	orthorhombique	2 clivages peu nets	2001	0,24	8,40	5,16	820

2. Propriétés des agrégats de porosité nulle (texture)

Nous considérons en premier lieu des agrégats de cristaux équigranulaires (en roches sédimentaires: texture jointive). L'étude préliminaire des roches monominérales permettra d'évaluer l'influence des joints de grains, du diamètre, du classement, du modelé et de la forme des cristaux en comparant les propriétés élastiques et mécaniques des agrégats à celles des cristaux du même minéral. Le passage aux roches pluriminérales fournira les lois des mélanges. Enfin, l'extension aux assemblages de cristaux de dimensions différentes complètera l'évaluation globale de l'influence de la texture des grains.

a) Agrégats monominéraux équigranulaires Les joints intergranulaires

La zone de transition entre deux cristaux contigus ne semble pas avoir une existance individualisée. Elle résulte probablement soit de l'accolement de deux structures cristallines dont la croissance s'est poursuivie jusqu'à ce que les distances intercristallines soient de l'ordre des distances interatomiques, soit du regroupement de dislocations en parois séparant des sous-grains désorientés. Le joint correspond donc à l'affrontement de deux réseaux, présentant de multiples gradins, liés à la fois par des forces d'attraction intermoléculaires et par des facteurs géométriques provenant de l'imbrication d'un réseau dans l'autre. Il semble que le joint puisse être décomposé en familles de dislocations et en lacunes, les atomes occupant des positions compatibles avec le minimum énergétique (J.M. BURGERS, 1940). L'accolement des deux cristaux ne se fait pas de façon continue: il subsiste des vides, de forme plus ou moins elliptique, qui peuvent, dans certaines conditions de tension, servir de point de départ à la formation d'une fissure (K.G. STAGG et O.C. ZIENKEWICZ, 1968).

TOURENQ (1974) a étudié les caractéristiques élastiques des calcaires et trouve des valeurs proches de celles de la calcite.

	porosité n (%)	V _l (km/sec)	E (t/cm²)
calcite (V moyenne)	_	6,60	870
calcaire fin	0,1	6,65	850
calcaire recristallisé	0,2	6,50	810

On peut en déduire que le joint, s'il est presque parfait, ne joue

aucun rôle en élasticité, même si la surface spécifique des cristaux est très différente. Au point de vue élastique donc, la seule distinction entre un monocristal et un agrégat polycristallin est l'atténuation de l'anisotropie, pour autant que les cristaux de l'agrégat aient une orientation quelconque.

Par contre, les joints peuvent jouer un rôle mécanique important: ainsi la résistance d'un calcaire fin à la compression peut atteindre 2000 kg/cm² alors que celle de la calcite n'est que de 300 kg/cm². Pour le quartz et les quartzites, par contre, les résistances sont voisines. La différence s'explique par les clivages de la calcite. Ils constituent des plans privilégiés de rupture dans le monocristal. Dans le calcaire, les directions de clivage sont réparties de façon isotrope, il n'y en a pas plus dans le quartz et les quartzites.

Différents facteurs interviennent dans l'analyse du rôle mécanique des joints: la propagation et la multiplication des dislocations, l'intensité des dislocations, l'intensité des forces de liaisons intergranulaires, l'énergie interne.

Les joints de grains constituent un obstacle à la propagation des dislocations d'un cristal à l'autre. Lorsque la roche est soumise à des contraintes qui l'amènent au voisinage de sa limite élastique, les dislocations viennent s'empiler dans un plan à la limite du cristal et provoquent ainsi une augmentation locale de son énergie interne d'où résulte une concentration des contraintes. Lorsque les contraintes deviennent plus importantes, elles peuvent mobiliser et multiplier les dislocations des grains voisins. Des bandes de glissement prennent alors naissance. Leur formation est d'autant plus aisée que les grains contigus ont une orientation voisine: une lamelle de glissement, dans un grain, peut être relayée dans le grain voisin par une lamelle d'orientation légèrement différente. Cette généralisation de la déformation à l'ensemble de la mosaïque cristalline correspond au début de la phase plastique. Au voisinage des empilements de dislocations, peut également se produire un cisaillement suivant le joint qui absorbe les dislocations qui sont empilées contre lui. Ce mécanisme intervient principalement lorsque l'orientation des cristaux contigus est très différente. Ce cisaillement peut servir d'amorce à un décollement intergranulaire ou à une fissuration.

L'intensité des forces de liaison intergranulaires est un facteur important. Les forces sont variables d'une roche à l'autre. Leur intensité est diminuée s'il existe des imperfections planes ou des pores dans l'espace intergranulaire qui réduisent la surface des joints où cet espace est de l'ordre de grandeur des distances interatomiques.

A cause de leur structure désordonnée, les joints intergranulaires ont une énergie interne supérieure à celle des cristaux. Ils sont donc

en principe des lieux de concentration des contraintes. La concentration est plus importante où se situent des aspérités, des ondulations, des points triples, des impuretés.

Elle peut entraîner une cassure des grains ou une fissuration intergranulaire conduisant à la rupture.

Les joints interviennent donc par de multiples facteurs dans la réaction d'un agrégat aux contraintes mécaniques. Ils jouent un rôle prépondérant dans la différence de comportement entre le monocristal et l'agrégat polycristallin monominéral.

Le diamètre moven des grains

Le diamètre moyen des grains est inversément proportionnel à la densité des joints. On peut donc affirmer que ce facteur n'intervient pas dans les propriétés élastiques de l'agrégat mais influence ses propriétés mécaniques.

L'expérience a montré que l'augmentation de la taille moyenne du grain diminue la résistance de la roche tant en compression (W.F. BRACE, 1965, E.T. BROWN et J.A. HUDSON, 1971) qu'en traction (C. TOURENQ et A. DENIS, 1970).

	Ø moyen	V _I (km/sec)	E (t/cm ²)	R_c (kg/cm ²)
calcaire compact recristallisé I	3000 µ	6,0	810	700
calcaire compact recristallisé II	μ 2000	6,3	860	1100
calcaire compact microgrenu	40 µ	6,4	840	2000

Cette constatation est d'ailleurs en accord avec la théorie de GRIF-FITH, 1920. La fissure qui se propage au moment de la rupture bute sur chaque joint. A chaque fois, une augmentation de l'énergie est nécessaire pour en assurer le franchissement.

Classement, modelé et forme des cristaux

Les études de P. LE BERRE, 1975, ont montré que l'influence du classement et du modelé des grains est négligeable devant celle de la taille moyenne, au moins pour les essais de traction (brésilienne) et de fragmentation dynamique.

La géométrie des grains a une importance si elle concerne l'imbrication des volumes. Une bonne imbrication empêche les mouvements intergranulaires et accroît la résistance des joints.

b) Agrégats pluriminéraux équigranulaires

Dans le cas des roches pluriminérales, à tout ce qui a été dit sur les

roches monominérales s'ajoutent les caractères propres à l'association de minéraux de propriétés différentes, groupés en proportions variables pour former un agrégat.

En ce qui concerne les propriétés élastiques, une double inégalité établie par G. HILL (1952) montre que le module d'expansion de volume $K = E/3 (1 - 2\nu)$ et le module de cisaillement $G = E/1 + 2\nu$ sont compris entre la moyenne harmonique et la moyenne arithmétique des caractéristiques correspondantes des constituants. Pour E et V_L , le mode de calcul le plus simple consiste alors en une pondération à partir des minéraux constitutifs selon les formules

$$E = \sum_{i} C_{i} E_{i}$$

et

$$V_{i} = \sum_{i} C_{i} V_{li}$$

où C_i est la proportion en volume du i-ème constituant. On obtient en fait une borne supérieure pour V_L . Quant à E, l'inégalité de HILL conduit à quelques difficultés pour déterminer une borne supérieure puisque E est lié à K et G par la relation

$$\frac{1}{E} = \frac{1}{3G} + \frac{1}{9K}$$

L'imprécision est cependant acceptable compte tenu de la dispersion des valeurs expérimentales des constantes des minéraux. Ces valeurs E et V₁ correspondent à un milieu rocheux idéal, de porosité nulle et absolument non fissuré.

La dureté Vickers d'une roche peut être mesurée par un pénétrateur dont l'empreinte a des dimensions bien supérieures au diamètre des grains. Pour des roches tout-à-fait compactes, la dureté mesurée est très proche de la dureté calculée (dureté moyenne pondérée):

$$dmp = \sum_{i} C_i dv_i$$

Dans le domaine de la résistance mécanique des agrégats pluriminéraux, on peut affirmer que les résultats obtenus aux divers essais destructifs et à l'usure vont dans le sens de la dureté de la roche, en première approximation. Cependant, les propriétés élastiques interviennent dans le cas de minéraux de modules d'élasticité différents. Des microfissures peuvent apparaître dans le minéral le plus rigide.

D'autres éléments liés à la nature minéralogique sont déterminants: les minéraux phylliteux sont en tous les cas néfastes, les roches très quartzeuses sont fragiles au contraire des roches à feldspaths qui obtiennent les meilleures performances à l'essai de fragmentation dynamique. Notons que la résistance à la traction, pour P. LE BERRE, 1975, serait fonction du rapport $dv/(E/\nu)$ des minéraux constitutifs.

La différence de dureté des minéraux intervient dans le phénomène de *polissage*. Sur une surface de granite par exemple, les grains de quartz restent en relief alors que des dépressions se produisent au niveau des micas, un niveau moyen étant constitué par les feldspaths (figure 6).

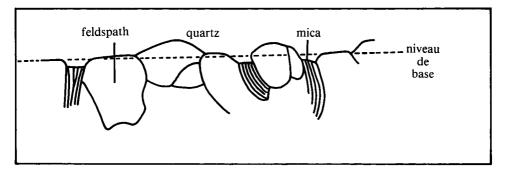


Figure 6: coupe schématique d'une surface de granite après polissage.

c) Agrégats inéquigranulaires

Le cas des textures éruptives holocristallines, cryptocristallines, microlithiques, graphiques, vitreuses et sédimentaires jointives a été envisagé puisque les cristaux y sont équigranulaires.

En dehors des roches éruptives à fexture porphyrique, il nous reste à examiner les textures réticulée et empâtée des roches sédimentaires. Nous distinguons les textures jointive (quartzitique dans le cas d'un squelette quartzeux), réticulée, empâtée suivant que les grains du squelette sont en contact franc, sont séparés par un filon microscopique ou flottent dans une matrice plus fine.

C. SCHROEDER (1975) a mis en évidence l'importance de cette distinction pour une série psammito-pélitique de roches du sous-sol de Liège. Les roches, testées en compression, sont composées d'un squelette quartzeux associé à un ciment (matrice) argileux. Tant que la texture est empâtée, l'influence de la teneur en quartz est faible et la résistance de la roche dépend surtout de celle du ciment argileux (la surface de rupture passe dans le ciment). Quand la texture devient réticulée, la résistance de la roche est par priorité celle de l'édifice des grains de quartz: une augmentation de la teneur en quartz a une

influence brusquement accrue sur la résistance du matériau rocheux (figure 7).

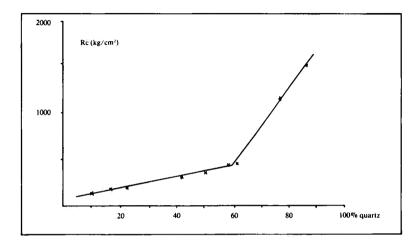


Figure 7: variation de la résistance en compression avec la teneur en quartz pour des roches psammitopélitiques.

On voit donc que le poids à accorder à la nature minérologique du ciment va dépendre du rôle qu'il joue dans la texture. La résistance est améliorée plus que proportionnellement par rapport à la diminution de la teneur en ciment quand on passe d'une texture empâtée à une texture réticulée et probablement aussi au passage d'une texture réticulée à une texture jointive.

Dans le cas d'une roche éruptive à texture porphyrique, l'influence de la texture est moindre parce que phénocristaux et matrice ont des caractéristiques semblables. La rupture peut se produire indifféremment dans les uns ou dans l'autre.

Examinons le cas particulier des roches qui contiennent une certaine fraction argileuse à tendance gonflante. Si on considère les liaisons présentes dans les roches argileuses, on peut les classer en quatre types (A. LEROUX, 1972). Les liaisons de Van der Waals dues aux forces d'attraction moléculaire ne jouent un rôle important que dans le cas de très petites particules comme dans le cas des sols argileux séchés et compactés où elles expliquent la résistance élevée de ces matériaux à l'état sec. Les liaisons hydrogène mettent en jeu une énergie notablement plus forte. Elles assurent par exemple partiellement la liaison entre les feuillets de kaolinite. La liaison hydrogène est caractérisée par le fait qu'un atome d'hydrogène sert à lier deux

autres atomes. Elle demande des atomes de forte électronégativité, dans le cas des argiles, l'oxygène.

Dans les argiles toujours, on trouve aussi des liaisons par introduction d'ions dans la structure. Ces liaisons peuvent être plus au moins fortes suivant la nature et l'abondance des ions et sont fort influencées par la teneur en eau. Ainsi, les liaisons sont très fortes dans le cas des muscovites et extrêmement faibles pour les montmorillonites, l'hydratation plus ou moins importante des ions pouvant aller jusqu'à les annihiler complètement.

Les liaisons texturales s'opposent aux précédentes en ce qu'elles nécessitent un apport de matière provenant soit des grains, soit du milieu extérieur. Elles concernent les matériaux rocheux tels les calcaires ou les grès. Ces liaisons sont beaucoup plus solides que les précédentes. Imaginons deux grains en contact. Sous l'action du poids des terrains, la zone de contact est comprimée et peut ainsi se dissoudre, favorisant le rapprochement des grains. Lorsque les grains sont en contact, il y a formation d'un dièdre concave favorable à la cristallisation. A la limite, les grains n'en font plus qu'un, avec cependant persistance du joint sous forme d'une zone fragile. Il y a eu passage de la texture réticulée à la texture réticuloquartzitique (figure 8). C'est un phénomène, à l'échelle des temps géologiques, qui commence au moment du dépôt et se poursuit pendant les phases de compaction et de lithification de la diagénèse.

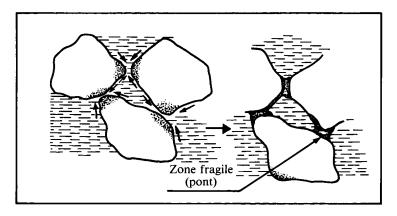


Figure 8: Formation de joints aux contacts entre grains.

Dans le cas du calcaire, les liaisons qui unissent les grains sont semblables à celles qui existent à l'intérieur des grains et sont essentielle-

ment de nature ionique. Ce sont donc des liaisons qui, aux défauts près, sont aussi fortes que celles qui assurent la structure du CaCO3. Dans les calcaires argileux, malgré la présence de quantités souvent importantes d'argile, les liaisons entre grains de carbonate sont telles qu'elles s'opposent à tout mouvement de ces grains et inhibent un gonflement possible des argiles. L'existence de liaisons intercristallines explique que même en présence d'eau les grains restent accrochés les uns aux autres, même pour les matériaux de faible résistance mécanique. Si on considère le cas très rare d'un calcaire parfaitement pur, on constate une légère contraction en présence d'eau, les forces capillaires ayant tendance à refermer les fissures. Dans tous les autres cas, on observe un gonflement. L'importance de la variation de volume est fonction de la nature de l'argile présente : les argiles de type smectite (montmorillonite) et certaines argiles fibreuses sont extrêmement gonflantes (expansion pouvant valoir plus de 100%); à l'opposé, des minéraux argileux tels que la kaolinite ne présentent qu'un gonflement de quelques pourcents. Quoi qu'il en soit, deux types de texture peuvent se présenter. Si les argiles remplissent les fissures, leur gonflement en présence d'eau va élargir ces fissures et amener une zone de rupture préférentielle. Si les argiles sont disséminées entre les grains, elles peuvent ou non avoir la possibilité de gonfler. Si le volume des vides est important, le gonflement a peu d'action sur les liaisons intergrains. Sinon, la présence d'eau peut engendrer des forces importantes qui peuvent provoquer une diminution sensible des caractéristiques mécaniques.

3. POROSITÉ ET FISSURATION

Les agrégats présentent des défauts de structure qui donnent à la roche un caractère discontinu. Les vides sont de deux types : les pores (sphéroïdes) et les fissures (surfaces - figure 9).

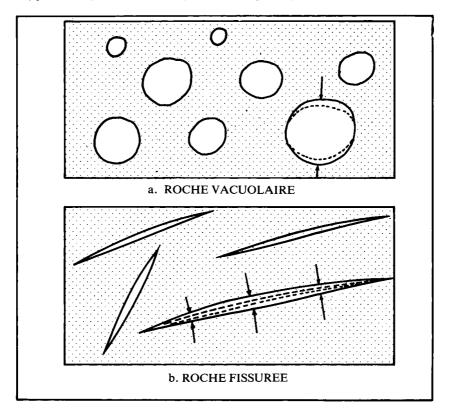


Figure 9: porosité de pores et de fissures.

Les pores sont des cavités de diamètre variable, du genre équidimensionnel. Ils peuvent être des interstices entre des cristaux ou des ouvertures dues à une dissolution partielle de la mosaïque cristalline par les eaux profondes. Ils peuvent aussi résulter de l'altération des minéraux accessoires et contenir des produits de remplissage, en particulier dans le cas de roches altérées. Les pores communiquent le plus généralement entre eux.

Les fissures sont des discontinuités planes très allongées, inter- ou intra-cristallines de 100μ à quelques mm de longueur, dont le rapport

de l'épaisseur à la longueur est de l'ordre de 10^{-3} à 10^{-4} . Leurs lèvres peuvent être lisses ou indentées. Elles affectent un nombre plus ou moins grand de cristaux dont elles peuvent suivre la direction de clivage facile. La porosité qui leur correspond ne dépasse pas 0,2 à 0,3%. Elles sont le plus souvent d'origine tectonique.

Les fissures peuvent se développer à partir de microfissures préexistantes ou de défauts (dislocations-coins par exemple), pores, inclusions, plans de décollement qui entraînent des différences de concentration des contraintes.

La porosité totale (n) d'un matériau rocheux se compose donc d'une porosité de pores (np) et d'une porosité de fissures (nf). Ces trois termes jouent un rôle important dans la perméabilité et les processus d'altération et aussi en mécanique des roches où elles influencent les propriétés élastiques et les résistances à la rupture.

C. Tourenq et D. Fourmaintraux (1971) ont étudié la variation de la vitesse des ondes longitudinales en fonction de n, np, nf. Ils nomment I_V (indice de qualité) le rapport V_I mesuré/ V_I calculé $(V_{lc} = \sum_i C_i V_{li})$. Portant les valeurs de I_V en fonction de la porosité totale n, ils constatent qu'elles se répartissent à l'intérieur d'un triangle bien délimité, que l'on peut graduer par des lignes d'égale porosité de fissures et d'égale porosité de pores. L'abaque obtenue (fig. 10) permet à partir des valeurs de I_V et de n, de différencier nf de np.

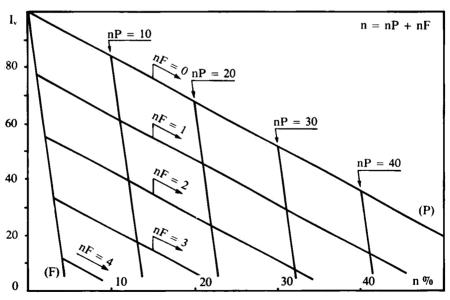


Figure 10: indice de qualité en fonction de la porosité.

Les mêmes auteurs ont établi une relation entre I_v et $I_E = E_m/E_c$ $(E_c = \sum_i C_i E_i)$ en fonction de np et nf. Cette relation est montrée à la figure 11.

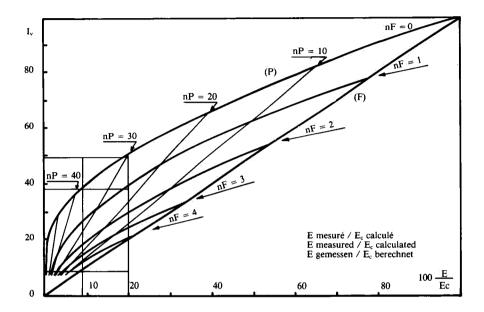


Figure 11: indice de qualité comparé au rapport des modules E_m/E_c.

La différence de comportement des roches fissurées et poreuses s'explique par le serrage des lèvres des fissures lors d'une mise en compression. Dans les roches à pores, une contrainte de compression laisse les vides ouverts, le module d'élasticité faiblit quand np augmente, il n'y a pas de différence entre les modules en compression et en traction. Dans les roches fissurées, le module de déformation est plus faible en traction qu'en compression; il augmente avec la contrainte qui favorise la fermeture des discontinuités (figure 12a).

Les fissures soumises à un champ de contraintes réagissent de façon variable suivant l'intensité des contraintes et l'orientation de la tension principale maximale par rapport aux plans de discontinuités. Pour des pressions très élevées, une cohésion totale de la roche est maintenue. Pour des pressions plus faibles, on observe quatre types principaux de comportements:

 la fissure peut se refermer et la roche est ramenée à un état proche de l'état non fissuré;

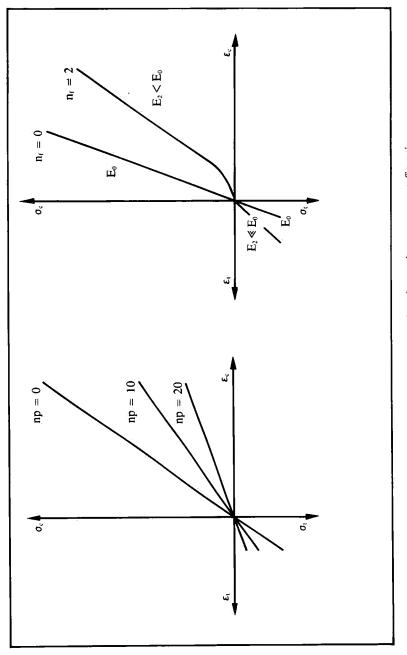


Figure 12a: modules de déformation des roches poreuses et fissurées.

- un glissement par friction peut se produire le long des lèvres de la fissure. Ce glissement est difficile lorsque les lèvres présentent des indentations;
- une concentration des tensions peut s'établir à la tête de la fissure, qui permet la rupture des plans moléculaires adjacents et la propagation de la fissure;
- lorsque la contrainte principale la plus grande augmente, on peut, à partir d'un certain niveau de charge; constater l'apparition près du sommet des fissures les plus sollicitées en cisaillement, d'amorces de fissures secondaires dont l'axe d'allongement est orienté suivant o_1 (J. BERNAIX, 1974).

Cette propagation de la fissure dépend de beaucoup de facteurs, tels que le champ de contraintes, la taille des grains, le type de liaisons qui les relient, la taille des fissures préexistantes, la densité de la roche, etc...

L'indice de qualité I_v renseigne sur la continuité du matériau rocheux. Toureno se refère à I_v pour classer les roches.

$I_{\mathbf{v}}$	milieu fissuré	milieu poreux
100 - 95	Très bon	
	Pas d'altération	n < 3%
95 - 90	Bon	
	Faible altération	$n = 3 \grave{a} 8\%$
80 - 90	Moyen	
	Altération nette	$n~=~8~\grave{a}~15\%$
60 - 80	Médiocre	
	Forte altération	n = 15 à 25%
< 60	Mauvais	n > 25%

Un tel classement n'est évidemment valable qu'à l'intérieur d'une même famille pétrographique et pour des textures semblables, au point de vue des résistances mécaniques. On sait en effet que V_1 est peu influencé par la texture des roches alors que les résistances en dépendent largement.

I_v n'est qu'un facteur parmi ceux étudiés jusqu'ici.

Une autre méthode de mesure indirecte de l'état de continuité de la roche consiste dans la comparaison du module d'élasticité et du module de déformation. En effet, la déformation d'une roche soumise à contrainte résulte de phénomènes élastiques et de glissements des lèvres des fissures. L'énergie absorbée par ces glissements n'est pas récupérable lors d'une décharge de l'éprouvette. La différence entre E_e et E_d est donc fonction de l'intensité de la micro-fissuration. SCHNEIDER utilise le rapport

$$\frac{E_e-E_d}{E_e}$$

4. HÉTÉROGÉNÉITÉ

Chacune des caractéristiques évoquées ci-avant présente des variations d'un point à l'autre du milieu rocheux. A partir des mesures réalisées, on construit un modèle: le matériau rocheux de caractéristiques moyennes. Celui-ci peut être fort différent du matériau réel au point de vue mécanique. Dans la roche réelle, la rupture s'amorce dans les zones faibles. La résistance du matériau est inférieure à celle du modèle homogène.

Des cas particuliers d'hétérogénéité sont les fissures recristallisées par des minéraux secondaires, les stylolites des calcaires qui contiennent souvent un résidu argileux, les lits alternés parallèles à la stratification. Là entre en jeu l'anisotropie qui aparaît déjà lors de la tendance à l'alignement des paillettes de mica par exemple. L'anisotropie est importante dans les roches métamorphiques.

5. LOIS QUANTITATIVES

L'analyse des propriétés géologiques des granulats permet d'expliquer leur comportement vis-à-vis des diverses sollicitations mécaniques qui s'exercent dans les ouvrages ou lors des essais.

Le pas suivant à franchir est la prévision de ce comportement et des résultats d'essais à la lumière des connaissances acquises. D'ores et déjà, des chercheurs ont dégagé des relations expérimentales chiffrées entre les caractéristiques élastiques et mécaniques des matériaux rocheux et certains paramètres géologiques parmi ceux étudiés ci-avant. Le paragraphe est consacré à la présentation de quelquesunes de ces relations, établies pour des roches supposées homogènes et isotropes.

a) Propriétés élastiques

Les facteurs essentiels des caractéristiques élastiques des roches telles que E et V₁ sont leur *nature* et leur *structure*. Tourenq (1971) a établi la relation suivante:

$$V_{l} = \sum_{i} C_{i} V_{li} - 0.016 \, np - 0.022 \, nf$$

C'est cette relation que traduit la figure 10. La figure 11 permet de passer aux valeurs du module de déformation.

Rappelons par ailleurs qu'en milieu homogène et isotrope, existent les égalités suivantes entre V_1 , V_t , E, ν :

$$E = \varrho V_l^2 \frac{(l-2\nu)(l+\nu)}{(l-\nu)}$$

$$\nu = \frac{\partial^2 - 2}{2(\partial^2 - 1)} \qquad \text{où} \qquad \partial = \frac{V_l}{V_l}$$

b) Usure et polissage

La résistance au polissage dépend surtout de la composition minéralogique de la roche: les minéraux interviennent par leur dureté et leur abondance relatives. Les données quantitatives de l'étude pétrographique permettent de calculer une valeur de CPA très voisine du coefficient mesuré.

On peut constater que tous les minéraux se polissent (sauf ceux dont l'architecture est vraiment trop défavorable; les minéraux fibreux tels que la serpentine ou les minéraux lamellaires tels que les micas et les chlorites) mais ils se polissent à des vitesses différentes d'après leur dureté. Le polissage procède d'une usure générale de la roche, en tous points semblables à une pénéplanation à laquelle se superpose une usure différentielle, génératrice de reliefs résiduels. Ceux-ci ne résistent pas à un polissage prolongé par abrasifs de granulométrie décroissante comme on en utilise pour obtenir des sections polies, tandis que lors de l'essai de polissage accéléré dont la durée est limitée, ces reliefs peuvent plus ou moins persister selon la dureté des minéraux qui les provoquent.

Dans le cas d'une roche monominérale, la topographie des surfaces d'essai dépend essentiellement de l'intensité de la pénéplanation en temps limité: elle est plus évoluée pour un calcaire pur que pour un quartzite puisque la dureté du quartz est 11 fois plus grande que celle de la calcite. Pour les roches polyminérales, à la pénéplanation plus ou moins intense qui dépend de la dureté moyenne de la roche se superpose la confection de reliefs résiduels par usure différentielle. L'abondance de ces reliefs dépend des pourcentages volumiques des minéraux qui les provoquent, leur amplitude est fonction de la différence de dureté entre ces minéraux et le minéral le plus abondant

dans la roche qui détermine un niveau de base. Des grains de quartz dans un calcaire provoquent plus d'irrégularités que des phénocristaux d'olivine ($D_v = 850 \text{ kg/mm}^2$) dans un basalte dont les microlithes feldspathiques ont une dureté de 700 kg/mm². Ceci explique que les roches les plus dures ne sont pas les moins polissables: les meilleures caractéristiques de microrugosité sont obtenues avec des mélanges de minéraux de dureté différente. Les minéraux tendres, comme les micas, sont donc souhaitables.

Pour *l'usure sur meule* par contre, la roche la plus dure est la meilleure. L'essai d'usure sur meule correspond au phénomène de pénéplanation et elle dépend de la dureté moyenne de la roche comme le montre le tableau IV.

L'essai de polissage accéléré, pour sa part, mesure le double effet de la pénéplanation et de l'usure différentielle qui sont liées respectivement à la dureté moyenne et au contraste de dureté, défini comme suit:

$$Cd = \sum_{i} C_{i} | Dv_{i} - Dmp |$$

Dv_i dureté Vickers du i-ème minéral Dmp dureté moyenne pondérée C_i proportion volumique du i-ème minéral.

La figure 12b montre la relation qui lie le CPA au Cd. Un ajustement faisant intervenir Dmp mène à une relation:

$$CPA = a + bDmp + cCd (D. FOURMAINTRAUX, 1970)$$

Les valeurs à attribuer aux coefficients a,b,c sont encore à l'étude. Le tableau ci-dessous donne une première série de valeurs qui conviennent pour l'ensemble des roches (FOURMAINTRAUX). Si on se limite aux roches calcaires, on obtiendra plus de précision avec la seconde série (ARCHIMBAUD). La troisième série convient pour les pierres belges utilisées en construction routière (SCHROEDER).

	Valeurs des coefficients a,b,c				
	а	b	С		
Toutes roches	30	0,015	0,07		
Calcaires	33,4	0,009	0,062		
Pierres belges	30	0,02	0,03		

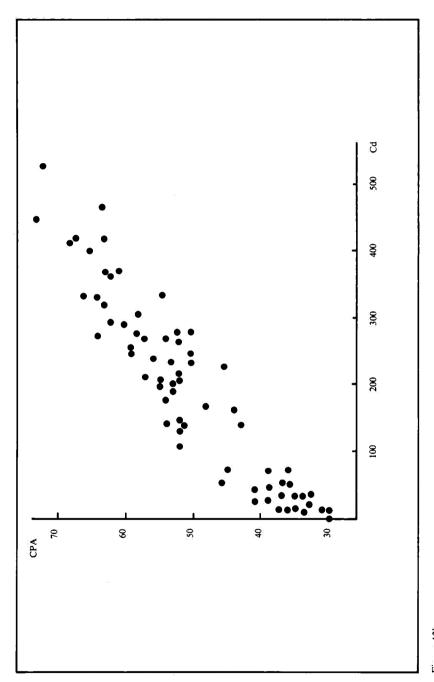


Figure 12b.

Pour la première série de valeurs du tableau, la comparaison entre les coefficients mesurés et calculés est satisfaisante, compte tenu de la dispersion de l'essai (figure 13). Les figures 14, 15, 16 et 17 montrent la variation du CPA pour des roches à deux composantes. La figure 18 montre l'influence de la porosité qui peut être assimilée à un minéral de dureté nulle.

c) Résistance à la rupture

D'une manière générale, la résistance d'une roche homogène et isotrope à un effort mécanique peut être envisagée comme la résistance d'un lot de même nature et de texture et structure idéales (texture jointive, grain fin, np = nf = O) diminuée de termes correspondants à la texture et la structure réelles du matériau rocheux. La relation peut s'écrire:

$$R = R_{max} - f_1(tx, R du liant) - f_2(\emptyset m) - f_3(np, nf)$$

 R_{max} ne dépend que de la composition minéralogique. Il s'exprime sous forme d'une moyenne arithmétique pondérée d'un paramètre où intervient la dureté. La fonction f_1 traduit l'influence du ciment s'il existe d'après sa nature et sa disposition (R du liant désigne une caractéristique analogue à celle prise en compte pour le calcul de R_{max} , tx représente l'état jointif, réticulé, empâté de la texture) f_2 représente l'incidence de la taille des grains et f_3 celle de la microstructure.

P. LE BERRE (1975) obtient d'une étude statistique la formule suivante pour la résistance à la traction des roches silicatées (Rtb en kg/cm², Ø m en microns):

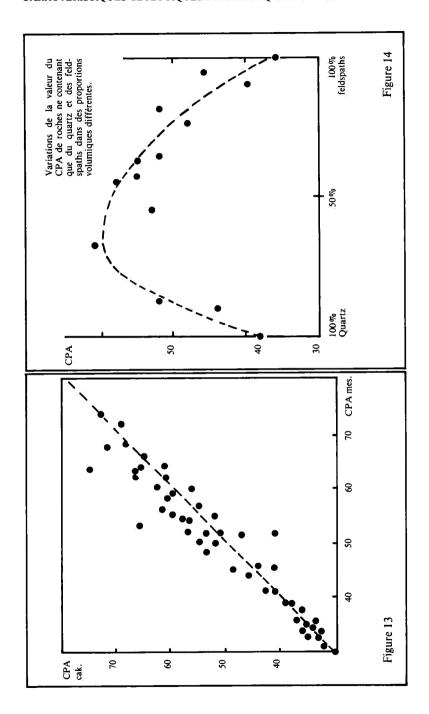
$$\log_{10}(Rtb - 40) = 0.7 \sum_{i} C_{i} \log Dv_{i} - 0.4 \log_{10} \emptyset m - 0.29 nf + 1.18$$

Cette formule a bien la forme de la relation générale. R_{max} ne dépend que de la dureté des minéraux. Les termes représentatifs de np, tx et R du liant n'apparaissent pas du fait que les roches étudiées ne comportent ni pores ni liant.

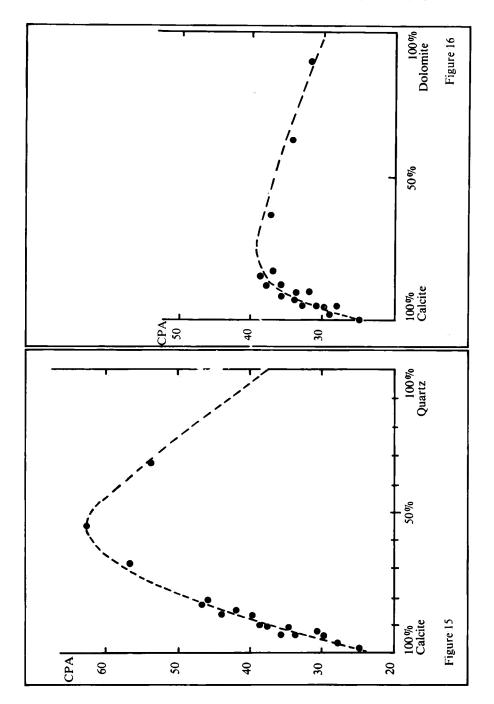
Le même auteur obtient la formule suivante pour la résistance à la fragmentation dynamique des mêmes types rocheux.

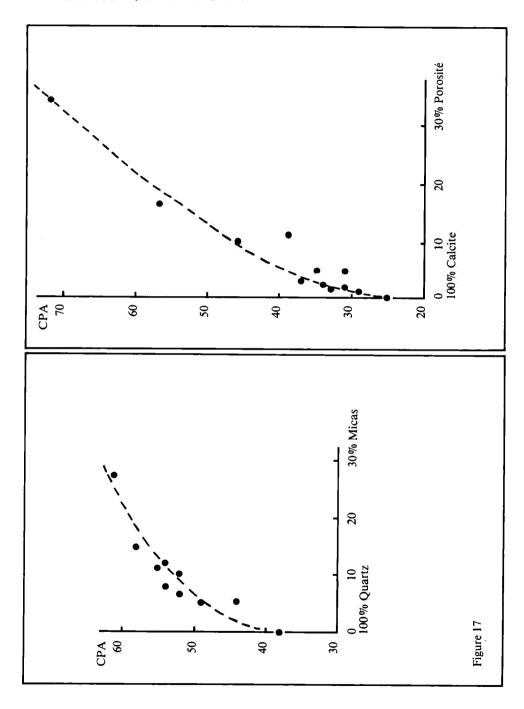
Fr = 1,8 - 19,0
$$\sum_{i} C_{i} \log_{10} \frac{Dv_{i}}{E_{i}/v_{i}}$$
 + 16,9 log₁₀ Ø m + 10,2 nf

Le terme R_{max} dépend ici de la dureté, du module élastique et du









coefficient de Poisson de chaque minéral, avec comme conséquence, par exemple, la supériorité du feldspath même par rapport au quartz.

TOURENQ et FOURMAINTRAUX (1971) ont mesuré la résistance à la traction de roches parfaitement compactes et de granulométrie différente ainsi que la dégradation de la résistance en fonction de la porosité, exprimée par

$$I_v = \frac{V_1 \text{ mesur\'e}}{V_1 \text{ calcul\'e}}$$

$$R_t = R_{tmax}(\emptyset) \frac{9}{105 - I_v}$$

Les valeurs de R_{tmax} sont les suivantes:

Ø (µ)	50	100	500	1000
Granites, Rhyolites, Diorites Gneiss, Leptynites, Quartzites	690	490	220	150
Gabbros, Basaltes, Dolérites Amphibolites	800	560	250	180
Calcaires	210	150	70	50

APPENDICE

a) Propriétés des familles rocheuses et utilisation sous forme de granulats

Pour illustrer cet aperçu des facteurs géologiques déterminants en mécanique des roches, commentons le tableau III donné par C. TOURENQ (1970) relatif aux propriétés physiques et mécaniques des roches. Les propriétés décrites sont:

- la masse volumique apparente	(g/cm³)	Q
— la porosité	(%)	'n
— la résistance à la compression	(kg/cm ²)	Rc
— la résistance à la traction brésilienne	(Kg/cm^2)	Rt
— le module d'élasticité	(t/cm ²)	E

 la résistance à l'attrition la résistance à la fragmentation Deval humide DH Los Angeles LA
Les roches caractérisées sont: — les granites (texture grenue) — les rhyolites (texture fine) — les syénites — les diorites — les microdiorites — les andésites — les gabbros — les gabbros — les gabbros à texture graphique (ophites) — les basaltes — les tufs et les cinérites — le meilleur des quartzites (grain fin et faible porosité) — les silex — un calcaire à 40% de porosité — un calcaire à 25% de porosité — un calcaire à 10% de porosité — un calcaire à 0,5% de porosité — un cornéenne métamorphique — un schiste métamorphique — les gneiss — les quartzites métamorphiques — les quartzites métamorphique — les quartzites métamorphique — les quartzites métamorphiques — les quartzites métamorphique — Qm

Au point de vue de la *dureté*, on peut classer ces familles en quatre groupes: (Si, Qs, Qm) contiennent 100% de silice, (Gr, Gn, Co) contiennent une proportion de silice associée à des minéraux de dureté moindre, surtout des feldspaths (Dv = $750 \, \text{kg/mm}^2$), (Sy, Di, mD, An, Ga, Ba) sont constitués de minéraux de dureté $600 \dots 800$ (olivine, pyroxènes, amphiboles), Sm et les calcaires sont formés de minéraux tendres (muscovite 90, calcite 110). On a ainsi classé les roches d'après leur dureté moyenne pondérée dmp = $\sum_i C_i \, \text{Dv}_i$. Au tableau IV, les roches ont été classées d'après la limite supérieure de leurs propriétés mécaniques. Il faut noter que l'andésite est handicapée par sa forte porosité (n = 20%).

44 CARACTÉRISTIQUES GÉOLOGIQUES ET MÉCANIQUES DES GRANULATS

TABLEAU IV: Classements des roches d'après leurs résistances mécaniques

$R_c (kg/cm^2)$	$R_t(kg/cm^2)$	LA	DH	Ü
Ba - 4500		mD - 7	Rh - 29	Qs - 0,40
Si - 4000	Si - 500	Gg - 8	Si - 25	mD - 0,46
Qs - 3600	Qs - 280	Rh - 10	Qs - 18	Gr - 0,54
Qm - 3600	Qm - 280	Ba - 12	mD - 17	Gn - 0,60
Rh 3400	Rh - 250	Qs - 15	Ba - 16	Sy - 0,70
Gn - 3000	Gg - 250	Co - 15	Qm - 15	Ba - 0,70
mD - 3000	mD - 250	Gn - 16	Gr - 10	
Gg - 2700		Di - 16	Co - 10	
Sy - 2500		Ga - 15	Gn - 9	
Gr - 2400	Gr - 170	Si - 19	Ga - 7	Rh - 0,80
Ga - 2300	Gn - 150	Qm - 20	Gg - 7	Gg - 0,80
Di - 2300	Di - 150		Di - 7	
Co - 2300	Sy - 150		Gr - 25	
Ca - 1900	Ga - 150	Ca - 26	Ca - 6	Ca - 1
An - 1100	Sm 140	Sm - 30	An - 4	
Sm - 700	An - 70	An - 38	Sm - 2	
Ca désigne	Ba, Co, Ca,	Sy ne figure	Sy ne figure	Di, An, Ga,
le calcaire	ne figurent	pas dans le	pas dans le	Si, Co, Sm,
4 du tableau	pas dans le	classement	classement	Qm absents
III	classement			

	Q	n	Rc	Rt	Е	VI	СРА	U	D	DH	LA
Gr	2,58	0,2	1200		400	3,4	0,50	0,54	8	5	25
Gr	2,69	2,0	2400	170	700	5,5	0,60	1,00	14	10	35
	2,59	0,3	1500	180	700	5,4	0,45	0.00	11	9	10
Rh	2,64	2,6	3400	250	800	6,0	0,55	0,80	30	29	20
C	2,68	0,4	1100	120	600	6,5		0,70	10		
Sy	2,82	2,0	2500	150	800	7,3		0,80	19		
D.	2,80	0,2	1400						11	5	15
Di	3,00	2,0	2300	150		5,5			21	7	20
	2,69	0,2	1600	160	900	6,1	0,45	0,46	8	6	7
MD	2,89	2,0	3000	250	100	6,4	0,55	1,10	14	17	10
_			700			2,3					
An	2,20	20	1100	70	95	2,6	0,54		4	3,5	38
Ga	3	0,2	1300	150		5,5			22	7	15
	2,95	0,1	2100		900	6,0	0.50	0,80	15		8
Gg	3,00	1,2	2700	250	1000	6,6	0,50	1,20	19	7	10
_	2,80	0,2	1300		600	5,4	0,40	0,70	14	9	12
Ва	2,90	0,7	4500		775	6,9	0,45	0,80	25	16	13
	2,65	0,2	1600	·				0,28	15	6	9
TC	2,69	1,0	3200				0,45	0,82	27	 29	16
Qs	2,65	0,5	3600	280	910	4,7	0,50	0,40	20	18	15
Si	2,60	0,2	4000	500		5,5			18	25	19
C1	1,50	40	60			1,9			ı	0,5	
C2	2,00	23	250			3,2		10	3	1,5	56
C3	2,40	10	750			4,5		3	6	3	44
C4	2,70	0,5	1900		·	6,0		1	12	6	26
со	2,63	0,2	2200						18	10	15
Sm	2,66	3,0	700	40 anisotropie 140		3,5 anisotropie 5,5	0,54		4	2	30
C-	2,58	0,1	1200	25		2,4	0,55	0,60	12	6	15
Gn	2,75	2,0	3000	150		4,0	0,62	0,80	18	9	30
	2.0		3100	120	·	3,3	0.63				•••
Qm	2,69	0,3	3600	280		4,7	0,52		19	15	20

Le groupe de dureté inférieure (Sm, Ca) présente avec l'andésite les caractéristiques les plus défavorables. Les groupes intermédiaires ne se distinguent guère l'un de l'autre. Le groupe des roches les plus dures se montre supérieur en traction et en compression où cependant les basaltes réalisent une étonnante performance, à l'usure, à l'attrition Deval. A l'essai de fragmentation Los Angeles, par contre, ces roches témoignent d'une fragilité malheureuse.

En ce qui concerne la dimension des cristaux, on vérifie que les roches à grains fins sont plus résistantes. Ainsi, les roches volcaniques ont de meilleures caractéristiques que les roches plutoniques, à composition minéralogique égale. Rhyolites, microdiorites, basaltes se montrent supérieurs à leurs homologues holocristallins (granites, diorites, gabbros) en compression, traction, fragmentation et attrition. D'après Toureno, il faut que la dimension moyenne des cristaux soit faible, inférieure à 50 microns, et cela quelle que soit la composition minéralogique, pour avoir des Los Angeles inférieurs à 15; inférieure à 20 microns pour des LA inférieurs à 10. Pour l'usure cependant, le granite surclasse largement le rhyolite mais les mesures manquent pour confirmer ce phénomène. On retrouve la même supériorité du grain grossier pour le CPA: granite 0,50 à 0,60; rhyolite 0,45 à 0,55; gabbro 0,50; basalte 0,40 à 0,45. On peut conclure que le grain fin a une influence bénéfique sur la résistance aux efforts mécaniques (ceci a été montré aussi pour des quartzites de diverses granulométries) et un effet néfaste vis-à-vis de la résistance au polissage et peut-être à l'usure.

L'influence de la *forme des grains* est illustrée par le cas de la texture graphique des ophites. Les ophites se montrent supérieures aux gabbros dans l'ensemble et même aux basaltes à texture microlithique en ce qui concerne la résistance à la fragmentation.

Dans le domaine de la *porosité*, on vérifie pour les calcaires de compacité croissante, l'accroissement des caractéristiques sauf, très normalement, pour le CPA.

b) Les granulats utilisés en Belgique

Les carrières belges exploitent des massifs rocheux qu'on peut ranger en trois catégories pétrographiques: les roches carbonatées (calcaires et dolomies), les roches gréseuses (quartzites, grès, psammites), les porphyres.

Calcaires et dolomies sont produits en grandes quantités tant pour le béton que pour la route. Leur prix est inférieur à celui des pierres dures grâce à la moindre usure des installations de concassage. Toutefois, ils doivent être écartés pour les couches de roulement en technique routière.

Les roches gréseuses ont un squelette constitué principalement de grains de quartz qui leur confère de bonnes caractéristiques mécaniques. Les porphyres, extrêmement compacts, apparaissent comme les roches belges les plus dures. Grès et porphyres sont utilisés là où les impératifs mécaniques l'exigent: couche d'usure des routes et ballast de chemin de fer.

D'autres granulats naturels apparaissent sur le marché belge: les graviers roulés de meuse exploités dans les gravières et les basaltes de l'Eifel en provenance de l'Allemagne fédérale.

En surface des chaussées, on utilise aussi des granulats artificiels à base de $Si O_2$ et $Al_2 O_3$ (bauxite calcinée par exemple), généralement pour leur couleur claire et leurs hautes performances mécaniques. Leur prix de revient est élevé.

Au rang des granulats artificiels, il faut citer encore les *laitiers de haut fourneau* qui peuvent convenir même en surface des routes et les matériaux des *anciens terrils* brûlés utilisables seulement en couches de fondations.

c) Les granulats utilisés outre-mer

Toutes les familles rocheuses sont exploitées de par le monde sous forme de granulats suivant leur disponibilité et la rigidité des normes locales. Dans les pays neufs, de vaste régions sont défavorisées au point de vue des richesses minérales dans le domaine des granulats. Souvent alors, les impératifs de développement accéléré et aux moindres frais prennent le pas sur les exigences de qualité et de sécurité. Toutefois l'ingéniosité des constructeurs peut dans certaines situations remédier au problème. Un brillant exemple est l'utilisation en climat tropical des *latérites* sous forme de béton naturel (sable - argile - latérite par exemple) comme matériel de route et même de piste d'atterrissage.

III. EXPÉRIENCES PERSONNELLES ET INTERPRÉTATION

Trente huit échantillons de roches ont été collectés dans seize carrières belges. On en a produit des éprouvettes et des gravillons à soumettre aux essais mécaniques de laboratoire ainsi que des lames minces destinées à l'étude pétrographique. Les résultats mécaniques et pétrographiques ont été confrontés de manière à mettre en relief les paramètres géologiques déterminants pour chaque type d'essais mécaniques.

1. CHOIX DES ÉCHANTILLONS

Les échantillons couvrent une large gamme de matériaux sédimentaires tant du point de vue de la *nature* minéralogique que de la *tex*ture et de la *structure*. On sait que ce sont là les trois facteurs essentiels du comportement mécanique des roches.

Ouinze échantillons appartiennent à la série psammopélitique:

- 2 quartzites (Ve La)
- 8 arkoses dont 3 à ciment dolomitique (01 02 03), 4 à ciment calcite (05 t1 t2 t5), 1 à ciment chloritique et calcitique (04)
- 5 grès et psammites à ciment argileux (Wa Wb Wc Lwl Lw2).

Vingt-trois échantillons proviennent de roches carbonatées:

- les dolomies sont représentées par 5 types (Da Db Di Nf No)
- les calcaires organoclastiques comprennent 5 types (Ba DO Md
 Na Ne)
- les calcaires cryptitiques et micritiques sont au nombre de 5 (Ma
 Mb Jb Nc Fo)
- les calcaires cryptitiques organoclastifères sont Mc Nd Dc
- CO est un calcaire dolomitique de même que Bb
- AO est un calcaire oolithique
- EO est un calcaire marneux Une marne gréseuse a été retenue: t4.

La composition minéralogique des roches sédimentaires peut figurer dans un diagramme tétraédrique dont les quatre sommets représentent respectivement les roches composées de minéraux durs

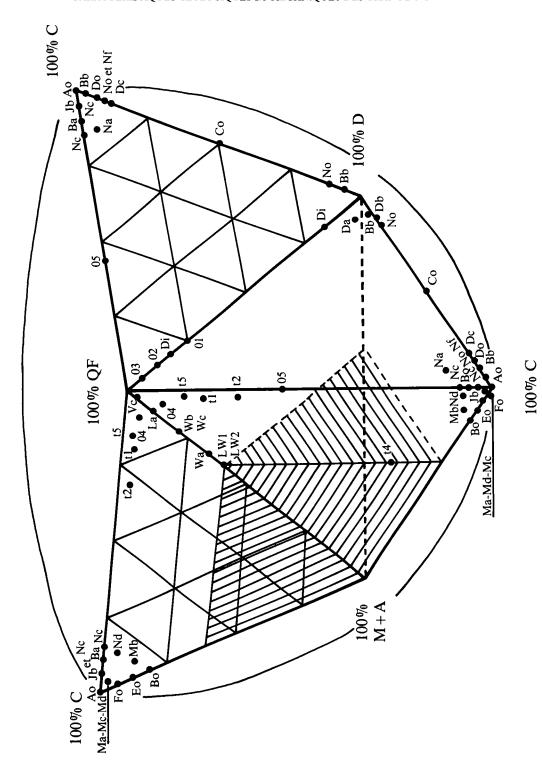


Figure 19: diagramme tétraédrique-nature des échantillons.

(quartz et feldspath), de minéraux phylliteux (micas et minéraux des argiles), de calcite, de dolomite. Un tel diagramme où apparaissent les 30 échantillons étudiés est présenté à la figure 19.

Si on exclut les roches comportant plus de 40% de minéraux phylliteux dont les caractéristiques mécaniques sont trop faibles pour l'utilisation en Génie civil, on vérifie que les points représentatifs des échantillons testés couvrent de manière satisfaisante le volume utile du diagramme. Il appartiendra à la suite des études entreprises aux Laboratoires de Géologie générale et appliquée de l'Université de Liège de compléter la couverture du diagramme.

2. LES DONNÉES PÉTROGRAPHIQUES ET MÉCANIQUES

Chaque échantillon est constitué d'un ou plusieurs blocs, prélevés dans le même banc. Le ou les blocs fournissent lames et carottes puis sont concassés de manière à concentrer tous les essais sur un volume minimum. Le concassage, réalisé avec des moyens de fortune, est spécialement fastidieux mais présente le considérable avantage de réduire l'hétérogénéité de la roche à sa valeur minimum. On s'assure ainsi que la détermination pétrographique et les résultats mécaniques concernent bien le même matériau.

Les données de départ consistent dans la description pétrographique au microscope polarisant, les caractéristiques élastiques et les résultats obtenus aux essais mécaniques. De la description pétrographique se déduisent la nature et la texture des échantillons. Des données élastiques, on extrait une image de leur structure. Tous les échantillons ont été étudiés en lame mince aux Laboratoires de Géologie générale et appliquée de l'Université de Liège. Les modules d'élasticité et de déformation ont été mesurés sur 29 échantillons (en tout 38 éprouvettes). La vitesse sismique a été relevée pour 25 types rocheux. La description de ces mesures ainsi que des essais mécaniques se trouve à l'annexe I.

Les essais mécaniques effectués sont les suivants:

- Usure sur meule et polissage accéléré pour 11 types rocheux;
- Compression simple pour 35 échantillons (77 carottes);
- Traction brésilienne pour 34 échantillons (80 carottes);
- Compression statique (6/8) pour 32 échantillons.

Les résultats des différentes mesures effectuées pour chaque échantillon figurent dans le tableau relatif à l'échantillon considéré. Le tableau présente de haut en bas:

— l'origine et la dénomination du type rocheux. Les informations relatives à l'origine sont la carrière, la position stratigraphique et

l'unité tectonique. L'identification comporte le numéro et le nom de l'échantillon. Les nomenclatures utilisées sont celle de P. MICHOT (1958) pour les roches de la série psammopélitique et celle de H. PIRLET (1965) pour les roches carbonatées. Elles sont décrites à l'annexe II

Ces modes de classification, établis par des pétrographes, présentent une utilité importante en mécanique des roches puisqu'ils font appel à la nature et à la texture des roches: MICHOT tient compte de la composition minéralogique, du diamètre moyen des grains et de la texture quartzitique, réticuloquartzitique, réticulée ou empâtée de la roche. PIRLET considère la nature des minéraux, leur origine et leur taille

- les observations relatives à la *nature*, la *texture* et la *microstructure* des échantillons avec, en regard, les *paramètres résultants* qui seront décrits ci-après.
- les caractéristiques mécaniques des échantillons. Les résultats d'essais sont donnés. Pour la compression simple et la traction brésilienne, le nombre de carottes essayées est indiqué entre parenthèses.

3. LES PARAMÈTRES QUANTITATIFS

Nous souhaitons pouvoir décrire l'état pétrographique des roches à l'aide du nombre minimum de paramètres. Les paramètres seront autant que possible chiffrés pour pouvoir être manipulés de manière mathématique.

Nature des échantillons

Le paramètre choisi comme représentatif de la composition minéralogique d'un type rocheux est la dureté movenne pondérée Dmp. Le choix se justifie par le fait que la dureté Vickers des minéraux est bien connue et semble être une caractéristique importante au niveau de la résistance mécanique des agrégats. Il est cependant probable que d'autres propriétés liées aux minéraux interviennent dans la résistance des roches. Il est possible aussi qu'une moyenne arithmétique pondérée ne soit pas l'expression la plus correcte pour apprécier le terme de dureté. Ainsi P. LE BERRE (1975) a établi que, dans le cadre de roches trop différentes des nôtres pour pouvoir leur appliquer sa théorie, la résistance à la traction brésilienne dépend de la moyenne arithmétique des logarithmes des duretés des minéraux constitutifs tandis que la résistance à la fragmentation dynamique est fonction de la moyenne arithmétique pondérée des logarithmes de la dureté divisée par le rapport du module d'élasticité au nombre de Poisson de chaque minéral.

Un paramètre secondaire lié à la nature de la roche est le contraste de dureté Cd qui intervient dans la résistance au polissage.

Texture des échantillons

Un premier paramètre représentatif de la texture est le diamètre moyen des grains Ø m. Classiquement on considère la dimension des grains du squelette, s'il existe. Le ciment a souvent une composition moins résistante que le squelette. Si donc la rupture se propage préférentiellement dans le ciment, c'est la dimension moyenne des éléments qui le composent qu'il importe de cerner. Tant que la texture est réticulée, nous prendrons Ø m égal à la dimension moyenne des grains du squelette. Quand la texture est empâtée, Ø m qualifiera la granulométrie du liant.

Un second paramètre textural est le type de texture (Q = quartzitique ou J = jointive, RQ et RJ réticuloquartzitique et réticulojointive, R réticulée, RE réticulo-empâtée, E empâtée).

Enfin, nous considérons la dureté du liant «Dmp liant», toujours dans l'optique d'une rupture préférentielle dans le liant.

Structure des Echantillons

A partir des valeurs mesurées des modules et de la vitesse sismique, nous calculons trois paramètres:

$$Ee - Ed/Ee$$
 $I_v = VI/VIth$ $I_E = Ed/Eth$

Une assez bonne corrélation s'établit entre I_E et (Ee - Ed)/Ee. Remarquons que pour les fortes valeurs de (Ee - Ed)/Ee (0,30 -0,50), I_E varie peu (9% à 20%). Le premier paramètre différencie mieux les types rocheux.

Par contre, I_v varie indépendemment des deux autres paramètres. Nous ne vérifions pas la relation I_E - I_v de TOURENQ (Figure 11). Une explication peut apparaître dans le mode de calcul du module de déformation.

Un terme «particularités» groupe les éléments structuraux et texturaux de nature à dévaluer les roches où ils sont observés. Nous avons retenu l'orientation préférentielle des micas, les réseaux de fissures recristallisées, les stylolithes argileux et la macrofissuration (visible à l'œil nu).

Caractéristiques externes

Il a été montré au chapitre I qu'outre les propriétés intrinsèques internes des échantillons, interviennent les propriétés géométriques des volumes testés dans les résultats des essais mécaniques. En ce qui concerne les carottes, le paramètre géométrique est constant et n'a donc pas d'influences. D'autre part, le concassage en grenailles a été réalisé d'une manière identique pour tous les types rocheux. On s'est ainsi affranchi de toute influence de chaînes de traitement spécifiques de chaque carrière. La différence de forme géométrique d'un échantillon à l'autre ne dépend dès lors que de la nature pétrographique. Il est donc parfaitement justifié de ne pas tenir compte de la géométrie externe des concassés comme d'un paramètre indépendant.

5. Interprétation des résultats mécaniques

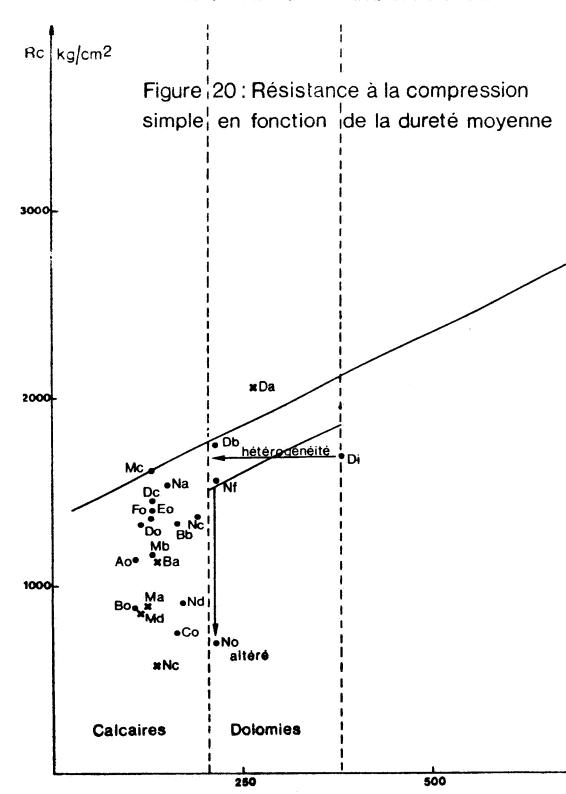
Les essais effectués se répartissent en deux catégories: les essais de résistance à la fracturation (compression simple Rc, traction brésilienne Rtb, compression statique sur gravillons 6/8 Cst) et les essais d'usure et de polissage (U et CPA).

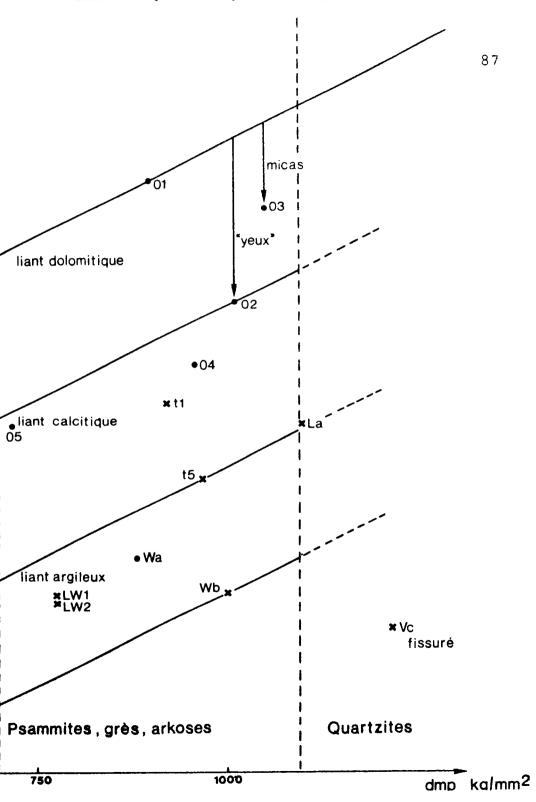
a. les essais Rc, Rtb, Cst

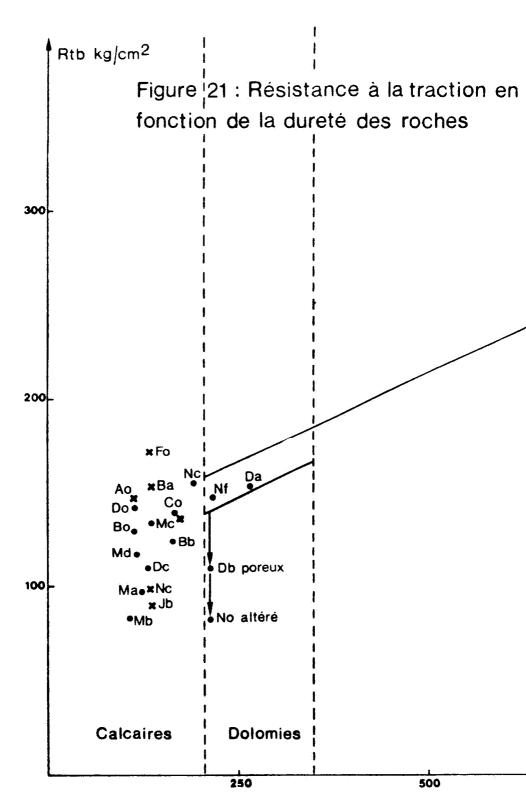
Les figures 20, 21, 22 montrent la répartition des valeurs expérimentales de résistance aux trois types d'essai en fonction de la dureté moyenne pondérée de chaque type rocheux. Les résultats des essais sur éprouvettes (Rc et Rtb) sont entachés d'une dispersion parfois importante. On a distingué sur les figures les valeurs fiables (obtenues sur plusieurs éprouvettes donnant des résultats proches) repérées par des points et les valeurs sujettes à caution notées par des croix (une seule éprouvette ou deux résultats très différents).

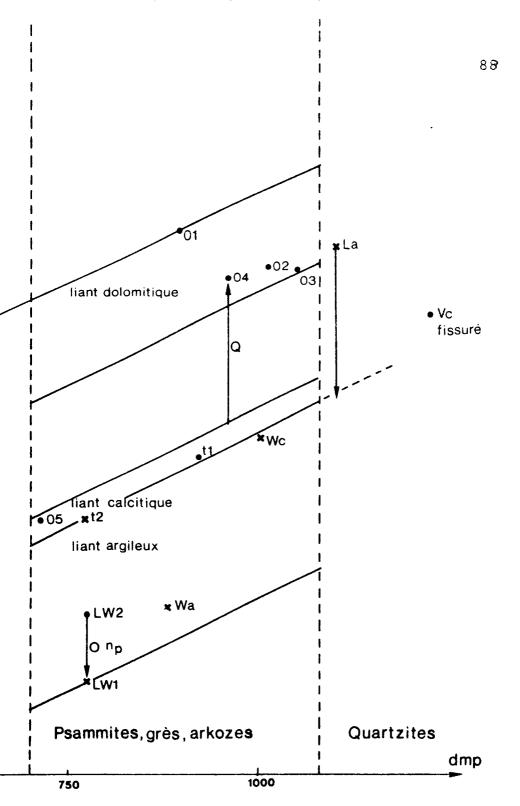
Quatre familles géologiques s'échelonnent sur l'axe des duretés croissantes: les calcaires en dessous de 240 kg/mm², les dolomies entre 240 et 400 kg/mm², les psammites, grès et arkoses de 700 à 1100 kg/mm² et enfin les quartzites, de dureté supérieure à 1100 kg/mm².

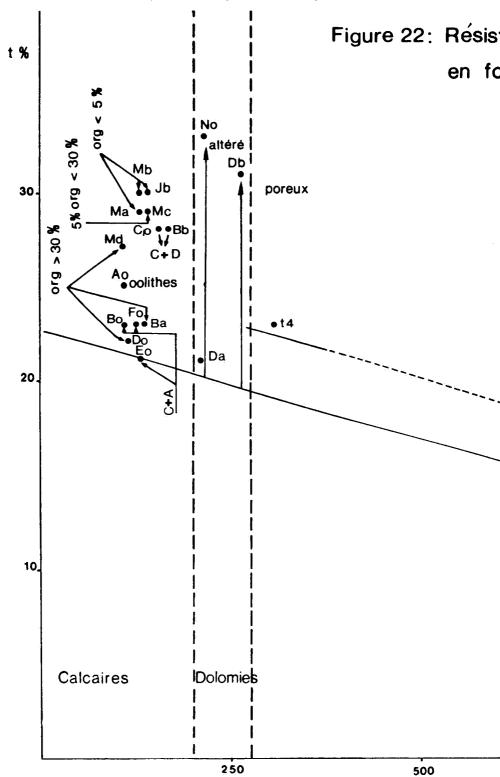
Les meilleurs résultats obtenus dans chacune des trois premières familles sont sensiblement alignés dans chacun des trois diagrammes. Les résultats du meilleur calcaire, de la meilleure dolomie et du psammite le plus résistant sont dans les mêmes rapports que les duretés correspondantes. La dureté moyenne pondérée Dmp apparaît bien comme le paramètre fondamental en ce qui concerne la résistance optimale des roches, c'est-à-dire celle qui correspond aux meilleures conditions de texture et de structure.



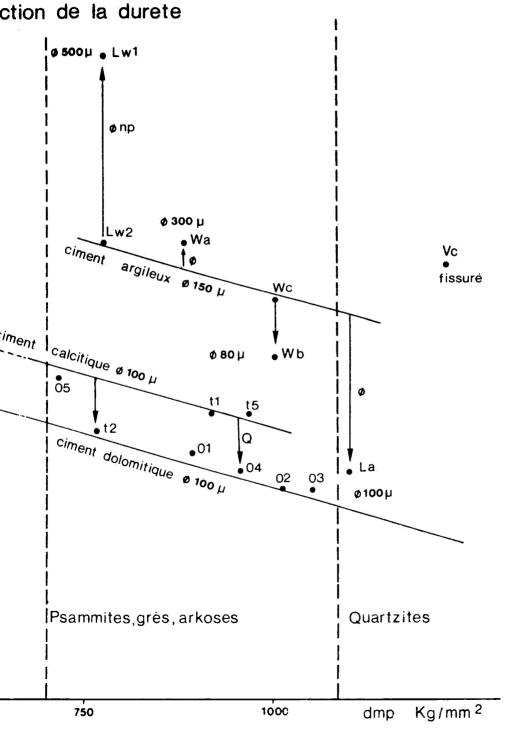








nce à la compression statique des gravillons 6/8



Les pentes des droites expérimentales donnant la résistance optimale en fonction de la dureté des roches sont les suivantes:

$$\frac{\Delta Rc}{\Delta dmp} = 0.02$$

$$\frac{\Delta Rtb}{\Delta dmp} = 0.002$$

$$\frac{\Delta Cst}{\Delta dmp} = 1.14 \cdot 10^{-2} \text{mm}^2/\text{kg}$$

Psammites, grès, arkoses

Si on groupe les échantillons de la famille d'après la nature du liant, on remarque que les résistances à l'intérieur de chaque groupe varient parallèlement en fonction de la dureté moyenne pondérée et que la pente commune est identique à celle de la résistance optimale. Pour la famille des psammites, grès, arkoses, la nature du liant (dolomitique, calcitique, argileux) est un facteur capital de la résistance. Elle précise la position de la droite de résistance dont la dureté moyenne donne la pente. Comme d'autres paramètres interviennent (microfissuration, diamètre moyen, porosité), on n'a pas l'alignement parfait. Les points se répartissent dans un domaine parfois relativement vaste.

La qualité du liant au point de vue de la résistance mécanique de la roche varie dans le même sens que la dureté: le ciment dolomitique est meilleur que le ciment calcitique, le ciment argileux donne les moins bons résultats. En fait, les roches à liant calcitique ont des résistances peu supérieures à celles des calcaires et les roches à ciment argileux se situent plus bas que les calcaires. Il apparaît donc que la rupture se propage de manière tout-à-fait préférentielle dans le liant.

En ce qui concerne les psammites à ciment dolomitique (01 - 02 - 03), 02 est défavorisé par des recristallisations massives de dolomite qui enchâssent des centaines de grains de quartz et se comportent comme des grains de grande dimension. Les grains de quartz, prisonniers à l'intérieur, ne jouent plus aucun rôle dans la résistance. 03 est handicapé par la tendance à l'alignement des paillettes de mica. L'influence de tels éléments texturaux est sensible en traction comme en compression simple mais non en compression statique.

Pour la série des grès et psammites à ciment argileux, on remarque la nette influence du diamètre moyen des grains sur les résultats de compression statique. La différence marquante entre LW1 et LW2 comme entre Wb et Wc est la granulométrie. Dans chaque cas, le grain fin donne le meilleur résultat. Il faut noter que LW1 est légèrement poreux. La porosité s'ajoutant à une granularité très grossière conduit à des valeurs médiocres de Cst et Rtb.

Quartzites

Il semble que les quartzites, dont la dureté est la plus élevée parmi les roches sédimentaires, n'aient pas une résistance à la compression statique en rapport avec ce paramètre. Le quartzite Ve donne un résultat plus faible qu'attendu au vu de sa dureté. Or, la macrofissuration intense qui l'affecte (et qui explique les performances médiocres en Rc et Rtb) ne joue vraisemblablement pas pour les grenailles issues du concassage. De plus, les caractéristiques élastiques de Ve sont de l'ordre de celles des psammites testés. Son état de microfissuration n'est donc pas préoccupant. On conclut que le quartzite obtient probablement des résultats moindres en Cst que les psammites à ciment dur. Deux faits peuvent expliquer cette faiblesse. D'abord, le quartzite est une roche fragile comme l'indique sa relativement faible résistance au choc (essai de fragmentation dynamique). Ensuite, le quartzite se concasse en gravillons très aigus (cassure conchoïdale). L'angularité des gravillons réduit les points de contact à l'intérieur du volume testé en Cst. Il s'ensuit une augmentation locale des contraintes entre éléments voisins qui favorise la fragmentation. Les caractéristiques intrinsèques externes ont une incidence dans le cas du quartzite.

Quant au psammitoquartzite La, il réagit mieux aux efforts appliqués, alors qu'il comporte pourtant une fraction non négligeable de liant argileux.

Dolomies

Parmi les dolomies testées en compression statique (Da, Db, No), seule Da a des caractéristiques favorables.

No est fort altéré, comme le confirment les paramètres élastiques. L'altération explique la mauvaise tenue de No pour les trois essais. Db est poreux. Sa faiblesse en Cst et Rtb vient confirmer l'influence de la porosité sur les résultats de ces deux essais.

Cependant, toujours comme pour LW1, la résistance en compression simple ne semble pas affectée.

Nf a des résistances en Rc en Rtb bien en relation avec sa dureté. Le calcaire à cherts Di, testé en compression simple, a réagi comme une dolomie. Il est normal, dans une telle roche hétérogène, que la rupture se soit produite dans les zones les plus faibles des éprouvettes. Di aurait sans doute mieux réagi en compression statique où le chert aurait joué un rôle efficace dans la résistance.

Calcaires

A l'intérieur de la famille des calcaires, la dureté ne constitue pas un critère de qualité mécanique, sauf pour fixer la résistance optimale (Cst = 20%, Rc = 1600 kg/cm², Rtb = 160 kg/cm²).

Comme les résultats obtenus aux trois essais conduisent à des classements semblables des roches calcaires, nous parlerons de la résistance mécanique globale dans entrer dans le détail de chaque essai.

Pour la série des calcaires cryptitiques comportant de 0 à 20% de débris d'organismes, les résultats sont nets. Les moins résistants sont Ja - Ma - Mb - Nc. Il s'agit de calcaires cryptitiques assez purs (C > 90%), partiellement recristallisés, exempts de fossiles et traversés par de nombreux joints stylolithiques. Ils proviennent d'horizons exploitables pour la chaux.

Les calcaires organoclastiques, qui comptent plus de 30% de fossiles, ne sont en général pas stylolithisés et sont dans ce cas les plus résistants (Ba - Na - Ne). Do et Md ont des stylolithes. Md se caractérise par une moindre résistance.

Do n'accuse pas de baisse de résistance, il compense les stylolithes par des caractères élastiques nettement supérieurs à ceux de son groupe.

Les calcaires organoclastifères, où apparaissent 5 à 30% d'organismes (Mc, Dc, Nd) ont des résistances intermédiaires.

Les calcaires dolomitisés Co et Bb, de même que le calcaire oolithique Do ont des résistances de l'ordre de celles des calcaires organoclastifères.

Au même niveau que les calcaires organoclastiques se situent les calcaires ± marneux Bo, Eo, Fo, ce qui est pour le moins imprévu.

En résumé, on peut conclure de ce qui précède:

- La dureté moyenne pondérée intervient pour fixer une borne supérieure de résistance et distinguer les psammites, grès, arkoses à ciment de même nature.
- La dureté du liant a une importance capitale dans la résistance des grès, psammites, arkoses.
- Les quartzites ne donnent pas de meilleurs résultats que les psammites à ciment dur.
- Les calcaires sont mal décrits par leur dureté, le pourcentage d'organismes est un facteur favorable, la présence d'argile diffuse n'est pas un handicap.
- Le diamètre moyen des grains a une influence sur la résistance des

roches silicatées qui n'a pas été vérifiée pour les calcaires.

— L'altération déforce de même que la microfissuration estimée par les caractéristiques élastiques et la porosité. La porosité a plus d'influence en compression statique et en traction qu'en compression simple.

b. Usure et polissage

La résistance des roches à l'usure est en relation nette avec la dureté moyenne pondérée comme l'indique la figure 23.

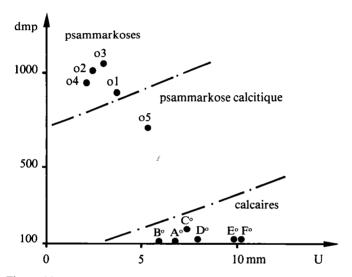


Figure 23: relation entre la résistance à l'usure et la dureté moyenne

Les psammarkoses sont les roches les plus dures (Dmp autour de 1000), elles s'usent le moins (2-3 mm). La psammarkose calcitique de dureté moindre (environ 700) s'use plus (5 mm) et les calcaires dont la dureté oscille autour de 100 seulement présentent la plus faible résistance à l'usure (6 à 10 mm). Pour les psammarkoses, les grains les plus grossiers donnent les meilleurs résultats.

Le figure 24 compare les valeurs obtenues pour les essais Rc, Ttb, Cst et CPA. On remarque que Rc, Rtb et Cst varient dans le même sens, ils dépendent des mêmes paramètres principaux.

Signalons en passant que le rapport Rc/Rtb = 8 donné par Griffith de façon théorique devient Rc/Rtb = 10 d'après nos résultats expérimentaux.

Le CPA varie de manière indépendante. C'est qu'il dépend d'un paramètre sans incidence sur les autres essais: le contraste de dureté Cd.

Pour les psammarkoses, le CPA est assez correctement apprécié à partir de la formule de FOURMAINTRAUX où on introduit les coefficients relatifs aux pierres belges:

п°	CPA mesuré	CPA calculé
01	57	59
02	53	58
03	59	58
04	54	58
05	60	61

CPA = 30 + 0.015 Dmp + 0.07 Cd

La psammarkose à ciment calcitique 05 compense sa dureté relativement faible par un contraste de dureté remarquable. Il atteint le meilleur résultat.

Pour les calcaires, la relation de FOURMAINTRAUX ne donne pas les résultats espérés, quels que soient les coefficients introduits. Les valeurs obtenues vont cependant dans le sens de la dureté et aussi du contraste de dureté: AO (39) et BO (36) ne comportent pas de minéraux durs, C (42) et D (47) contiennent de la dolomite, E (49) et F (54) sont porteurs de pyrite. La présence de granules de pyrite en faible proportion mais de très petite taille, donc nombreux, conduit à un bon CPA (49 et 54). On obtient une rugosité à une échelle inférieure à celle des psammites par exemple mais qui peut se révéler aussi efficace.

Il semble d'autre part que DO et AO soient favorisés par les grands éléments qu'ils contiennent. Il est probable qu'une usure différentielle apparaisse entre ces grandes plages et le ciment. La formule de FOURMAINTRAUX serait sans doute améliorée si on y adjoignait un terme de *texture*. Des recherches complémentaires seront poursuivies pour éclaircir ce point.

IV. CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Dans le domaine des granulats utilisés en génie civil, l'étude pétrographique offre un large éventail de possibilités. L'observation détaillée des caractères géologiques des roches présente un intérêt considérable dans l'évaluation des qualités de résistance des granulats au gel, à l'action physique de l'eau, aux agents chimiques présents dans l'eau et le ciment, aux diverses sollicitations mécaniques. Toutes ces caractéristiques sont précisément celles sur lesquelles portent les exigences des constructeurs.

Dans le cadre de la résistance des granulats aux efforts mécaniques qui fait l'objet de la présente étude, la pétrographie contribue largement à la compréhension des comportements mécaniques des matériaux rocheux. Une définition pétrographique précise réduit la dispersion des résultats observés lors des essais de laboratoire. L'étude montre par exemple le rôle joué par la nature du ciment dans la résistance des psammites. La seule définition de la nature minéra-logique du liant permet de réduire l'intervalle des valeurs observées dans le rapport 1 à 3. L'étude pétrographique rend les essais plus fiables par une meilleure intelligence des résultats obtenus. S'ils paraissent parfois déconcertants à l'échelle mégascopique, la pétrographie les explique à l'échelle microscopique. C'est à cette échelle que la roche réagit aux sollicitations de toute nature.

Au fur et à mesure que progresse la connaissance des mécanismes qui régissent le comportement des matériaux rocheux, il est possible d'affiner la prévision des résultats des essais. Les études menées à l'heure actuelle précisent la mesure dans laquelle joue chaque paramètre intrinsèque. La définition des paramètres influents et leur hiérarchisation correcte aboutit à l'énoncé de relations quantitatives. telles la formule de FOURMAINTRAUX qui estime la résistance au polissage à partir de deux critères importants : la dureté moyenne et le contraste de dureté. Dans la gamme des roches sédimentaires étudiées ici et dans le domaine routier où les exigences sont les plus sévères, on peut affirmer, par exemple, que les grès et les psammites à ciment dolomitique et calcitique sont, d'après les normes belges, utilisables en surface dans tous les cas, qu'il faut se méfier même pour les fondations des grès à ciment argileux surtout s'ils sont grossiers et que certains calcaires qui comportent une proportion, même faible, de minéraux durs (quartz - pyrite) ont des caractéristiques mécaniques suffisantes pour servir de revêtement. On pourrait s'étonner qu'un mémoire répondant à une question de l'Académie royale des Sciences d'Outre-Mer ait porté l'attention sur des roches du sous-sol belge. Cependant, ce n'est pas tant le lieu d'origine des roches qui importe que leurs caractéristiques intrinsèques. Nos conclusions sont valables pour les roches sédimentaires exotiques des mêmes types que celles étudiées ici, pour autant qu'elles soient dans le même état d'altération. L'action de la biosphère sur la dégradation des roches est très importante tant en régions désertique que sous des climats tropicaux.

L'utilité pratique des données pétrographiques saute aux yeux. La description fine des lames minces est un outil rapide, fiable et peu coûteux tant au stade de la prospection des gisements que de leur exploitation en carrière ou du contrôle des fournitures. Dans chaque cas, elle offre l'avantage de pourvoir déduire du même coup des informations relatives à toutes les caratéristiques qui intéressent les maîtres d'œuvre.

Lors des études de prospection, l'analyse des caractères intrinsèques de la roche se révèle indispensable. Elle nécessite un minimum d'opérations sur le terrain: le simple prélèvement d'échantillons de très petites dimensions comparées à ce qu'exige un seul essai mécanique. Dans les pays neufs où les espaces à investiguer sont vastes, par rapport aux possibilités de communication, ce n'est pas un mince avantage. Quelques tournées d'un géologique expérimenté et bien au courant des conditions locales, parcourant à pied les sites intéressants peuvent donner lieu à une évaluation qualitative des ressources régionales en matériaux rocheux. On est en mesure d'évaluer la qualité des roches pour chaque domaine d'utilisation des granulats et d'orienter dans chaque cas les recherches vers les meilleurs matériaux. L'intégration à l'échelle nationale peut servir de base à l'aménagement du territoire, en ce qui concerne l'implantation des exploitations d'après les besoins locaux ou régionaux en qualité comme en quantité.

Lors de la phase de reconnaissance détaillée d'un site connu de façon préliminaire, l'étude de lames minces prélevées de façon systématique, banc par banc par exemple, est très importante. Outre le fait que certaines caractéristiques, comme par exemple l'altérabilité, ne peuvent être décelées que par cette voie, elle oriente de manière économique et efficace la campagne d'essais de génie civil et conduit à une interprétation correcte des résultats. En effet, elle donne une image fidèle de l'homogénéité du gisement et répartit les matériaux en types rocheux bien définis. Certaines fractions de gisement, où les types rocheux dominants sont médiocres au point de vue mécanique d'après l'étude géologique, ne seront pas examinées plus en détail.

Pour les zones intéressantes, les essais mécaniques testeront des échantillons représentatifs des types rocheux reconnus par la pétrographie et dont on connaît la proportion dans l'ensemble.

Au niveau de *l'exploitation en carrière*, l'étude pétrographique présente un intérêt comme instrument de contrôle pour étudier au front de taille les variations de faciès qui régissent les caractéristiques mécaniques des granulats sortant à l'autre extrémité de la chaîne d'élaboration.

Enfin, au stade de *la réception des matériaux*, elle permet un contrôle rapide et quasi continu du lieu d'extraction, de l'homogénéité et la conformité au cahier des charges.

ANNEXE 1: LES ESSAIS MÉCANIQUES

Pour évaluer les qualités mécaniques des granulats, de nombreux essais ont été mis au point. R. DANTINNE, 1965 en décrit un certain nombre. Des essais s'effectuent sur des éprouvettes de roches, d'autres sur les gravillons. Les premiers sont ponctuels, ils supposent une connaissance approfondie de la géologie du site d'extraction afin de prélever des échantillons représentatifs. Ils sont plus influencés que les essais sur granulats par la macrofissuration. En effet, lors du concassage, la roche se découpe suivant ses plans de fissures. Le volume du granulat après concassage est donc plus sain que celui de la roche-mère.

1. ESSAI DE COMPRESSION SIMPLE (sur éprouvette)

Une éprouvette cylindrique est comprimée entre les plateaux d'une presse jusqu'à rupture. Le plateau supérieur de la presse est muni d'un rotule. L'élancement de l'éprouvette doit être suffisant ($h \ge 2\emptyset$) pour éviter l'effet de frettage des plateaux. On déduit la contrainte de rupture par compression simple (Rc) de la charge de rupture Pr par l'égalité Rc = $4 \text{ Pr}/\pi \varnothing^2$ valable dans la partie centrale de l'éprouvette non influencée par le frettage des plateaux à condition que l'élancement h soit suffisant. La vitesse de mise en charge influence le résultat. On la souhaite aussi lente que possible (en pratique de l'ordre de 4 tonnes/minute).

Pour les éprouvettes d'élancement insuffisant ($h/\emptyset < 2$), OBERT donne la formule suivante qui permet de passer de Rc mesuré à Rc pour $h/\emptyset = 2$

$$Rc = Rcm \frac{0,778 + 0,222(1/2)}{0,778 + 0,222(\emptyset/h)}$$

Les échantillons 01 à 05 et A0 à F0 ont été testés au laboratoire des Pierres du Génie Civil de l'Université de Liège. Les autres échantillons ont été testés au Service d'Etude et de Contrôle de l'Infrastructure des Routes à Bruxelles (SECIR).

2. MESURE DES MODULES DE DÉFORMATION ET D'ÉLASTICITÉ (sur éprouvette)

Comme pour l'essai de compression simple, on utilise une presse dont le plateau supérieur est muni d'une rotule. Des capteurs inductifs permettent de mesurer le rapprochement des plateaux de la presse et donc la déformation axiale de l'éprouvette. On effectue des cycles de charge-décharge à vitesse contrôlée (4 tonnes/minute).

Sur le diagramme contrainte-déformation obtenu (exemple à la figure A1), on mesure la pente de la droite de montée en charge (module de déformation E_d) et la pente des droites parallèles représentatives des décharges successives (module d'élascicité E_e). De la pente $\Delta P/\Delta h$ on passe au module par la relation

$$E = \frac{\Delta P}{\Delta h} \cdot \frac{4 h}{\pi \varnothing^2}$$

Pour les échantillons 01 à 05 et A0 à F0, la mesure des modules a été effectuée au cours de l'essai de compression simple. La déformation a été enregistrée jusqu'à 25 tonnes. Au delà de cette charge, la rupture devient trop brutale, compte tenu de l'élasticité de la presse. Il faut retirer les capteurs inductifs pour éviter leur destruction.

Les mesures de déformation relatives aux autres échantillons ont été réalisées au Laboratoire des Mines, Sondages et Mécanique des Roches de la Faculté Polytechnique de Mons. La capacité de la presse est de 12 tonnes. La déformation est enregistrée jusqu'à cette charge.

3. ESSAI BRÉSILIEN DE TRACTION (sur éprouvette)

Les éprouvettes cylindriques sont soumises à compression entre deux plans parallèles à leur axe. La rupture a lieu dans le plan diamétral parallèle à la ligne d'action de la force de compression. Ce plan est en effet soumis à des contraintes de traction (figure A2).

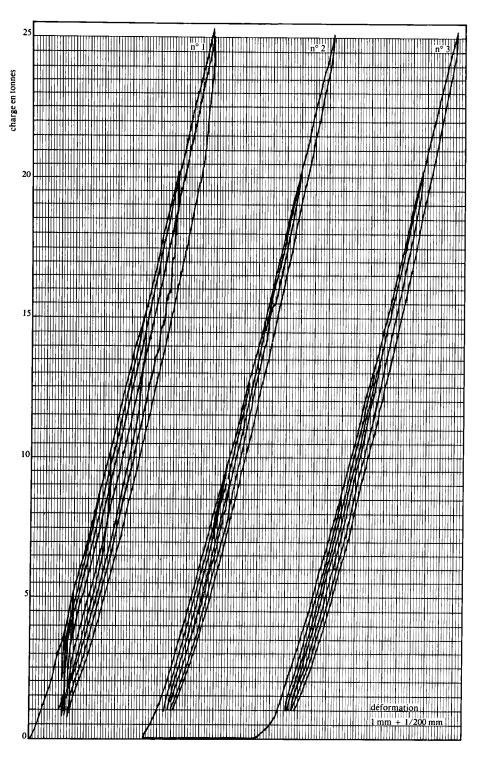


Figure A1

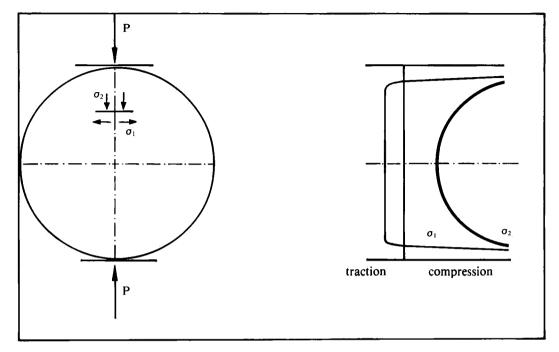


Figure A2: Essai Brésilien, contraintes dans le plan diamétral.

Entre les plateaux et l'éprouvette sont intercalées deux plaques de carton fort qui répartissent les efforts sur un axe de 5 à 10°. Il se crée ainsi un champ de contraintes multiaxiales que la formule classique

Rtb =
$$\frac{2 \text{ Pr}}{\pi \varnothing \text{ h}}$$

néglige. La rupture est supposée en traction simple. La contrainte de rupture en traction brésilienne Rtb est ainsi toujours supérieure à la valeur obtenue en traction simple.

Les échantillons 01 à 05 et A0 à F0 ont été testés au Laboratoire des Pierres du Génie civil de l'Université de Liège. Les autres échantillons ont été testés au SECIR à Bruxelles.

4. MESURE DE LA VITESSE DE PROPAGATION DES ONDES LONGITUDINALES (sur éprouvette)

Un émetteur piézo-électrique est mis en contact avec une face de

l'éprouvette à tester. Il est excité par un générateur d'impulsions qui émet un train d'ondes. Un capteur situé sur l'autre face de l'éprouvette transforme les ondes reçues en un signal électrique amplifié et visualisé sur un oscilloscope (intensité en fonction du temps). La longueur «t» sui sépare le temps d'émission de l'onde du premier pic enregistré au capteur, convertie en temps permet le calcul de la vitesse de l'onde

$$V_1 = h/t$$

Les mesures de vitesse sismique ont été réalisées au Laboratoire de l'Unité de la Construction de l'Université de Louvain.

5. ESSAI D'USURE SUR MEULE (sur éprouvettes)

Deux éprouvettes cylindriques (Ø = 8 cm) sont posées sur un disque. Elles sont maintenues en place par des porte-éprouvettes qui coulissent verticalement. Une charge de 250 gr par cm² de section est appliquée sur les éprouvettes. Le disque tourne à 40 tours/minute pendant 50 minutes, ce qui représente 3000 m de parcours. Les porte-éprouvettes tournent sur eux-mêmes à raison d'un tour pour 60 à 100 m de parcours. On emploie comme abrasif du sable des dunes de granulométrie normalisée. L'alimentation se fait devant les éprouvettes au débit continu de 150 gr de sable sec pour 100 m de parcours et par éprouvette. Le sable est raclé de la piste derrière les éprouvettes. Le résultat de l'essai (U) est la différence moyenne en mm des hauteurs des éprouvettes avant et après usure.

Les résultats obtenus dans le cadre de l'étude proviennent du Laboratoire des Pierres du Génie civil de l'Université de Liège.

6. ESSAI DE POLISSAGE ACCÉLÉRÉ (sur gravillons)

On choisit un à un, dans un lot (calibre 8/10), des granulats pour fabriquer deux petites plaques d'«enduit superficiel». Les granulats sont disposés avec soin, de manière à soumettre à l'usure une face et non une arête. Les plaques sont alors fixées sur une roue, capable d'en porter quatorze (6 échantillons + 1 pierre «Enderby» de référence). Cette pierre va tourner pendant six heures à vitesse déterminée, en usant les plaques sur du caoutchouc. Un abrasif normalisé est interposé: du sable durant les trois premières heures, de l'alumine pendant les trois suivantes. Après les six heures, on mesure la résistance au glissement grâce au pendule du Road Research Laboratory, ce qui détermine le coefficient de polissage accéléré (CPA).

Les résultats obtenus pour cet essai proviennent du Laboratoire des Pierres du Génie civil de l'Université de Liège.

7. ESSAI DE COMPRESSION STATIQUE (sur gravillons)

Les granulats de calibre normalisé (dans notre cas 6/8) sont placés dans un cylindre de diamètre 76 mm et de hauteur 70 mm, en trois couches damées chaque fois à l'aide d'un pilon cylindrique. La hauteur de remplissage du cylindre doit atteindre 50 mm. On ferme le cylindre par un piston de diamètre 75 mm. Le récipient est placé entre les plateaux de la presse et la charge est appliquée régulièrement jusqu'à un maximum de 10 tonnes, elle est alors maintenue pendant deux minutes. Après l'essai, l'échantillon est tamisé à 2 mm. La fraction éliminée par le tamisage, exprimée en pourcentage du poids total, exprime le résultat de l'essai (Cst).

Les échantillons 01 à 05 et A0 à F0 ont été testés au Laboratoire des Pierres du Génie civil de l'Université de Liège. Les autres résultats proviennent du SECIR à Bruxelles.

8. ESSAI LOS ANGELES (sur gravillons)

Un poids déterminé de granulats à tester (5 kg) est introduit dans un tambour ainsi qu'une certaine charge de boulets dépendant du calibre de l'échantillon. Le tambour tourne pendant un temps et à une vitesse déterminés. On tamise alors l'échantillon en lavant au tamis de 1,6 mm et on appelle coefficient Los Angeles (LA) la perte en pourcentage. L'essai Los Angeles s'effectue à sec, il mesure la résistance des granulats au choc contre les boulets et les parois et à l'attrition des éléments entre eux.

9. ESSAI DE GÉLIVITÉ (sur gravillons)

Deux prises d'essais identiques sont préparées. Sur l'une on détermine le coefficient Los Angeles. L'autre est saturée d'eau puis soumise à vingt-cinq cycles de gel-dégel avant d'être introduite dans le tambour Los Angeles. Le résultat de l'essai est le rapport des deux coefficients LA ainsi déterminés.

10. ESSAI DE FRAGMENTATION DYNAMIQUE (sur gravillons)

Le principe est le même que dans l'essai de compression statique mais la sollicitation mécanique qui s'applique sur le piston du récipient est fournie ici par la chute d'un mouton d'une hauteur déterminée et un certain nombre de fois. Le pourcentage de fines produites est ici encore le résultat de l'Essai (Fr.).

11. ESSAI DEVAL (sur gravillons)

L'essai Deval est effectué sur 44 pierres taillées à la main, d'un poids total de 5 kg et de calibre 40/70. Il est actuellement remplacé par le Microdeval qui teste les gravillons de petit calibre.

Dans l'essai Deval, les granulats sont introduits dans un cylindre mis en notation autour d'un axe faisant un angle de 30° avec le sien propre à vitesse constante pendant un temps déterminé. Le résultat de l'essai est calculé à partir de la quantité de fines produites (on tamise à 1,6 mm et on appelle coefficient Deval la quantité 400/Q, Q passant en grammes. L'essai mesure la résistance à l'attrition des granulats entre eux. L'essai peut être exécuté à sec ou en présence d'eau (DS et DH). Le DH donne généralement des résultats inférieurs. L'eau agit dans deux sens opposés. D'une part, elle freine les matériaux, les chocs sont donc amortis et d'autre part, elle imprègne les granulats poreux qui deviennent moins résistants au choc. Le DH donne donc des résultats meilleurs que le DS pour le silex par exemple mais il sanctionne les granulats à poids volumique faible.

L'essai *Microdeval* s'effectue sur 500 grammes de calibre 4/6, 6/10 ou 10/14 auxquels on ajoute une charge de billes d'acier de Ø 10 mm. Une excellente corrélation lie les résultats du Deval à ceux du Microdeval:

$$D \times MD = 80$$

12. MESURE DE LA DURETÉ VICKERS

Un microduromètre comprend un pénétrateur en diamant qui a la forme d'un pyramide à base carrée. La dureté Vickers est le rapport de la charge appliquée à la surface de l'empreinte laissée par le microduromètre dans une face plane de la roche à tester.

ANNEXE II: NOMENCLATURE DES ROCHES SÉDIMENTAIRES COURANTES

La présente nomenclature, inspirée de P. MICHOT (1958) et H. PIRLET (1965), est basée sur trois critères: nature minéralogique, granulométrie et texture.

Nature minéralogique

On distingue trois groupes importants de minéraux

le quartz et les feldspaths Q, F les argiles et les micas A, M les carbonates: calcite et dolomite C, D

 Le substantif de base de la nomenclature tient compte du groupe dominant

Q, F dominants - quartzites, arkoses, grès, psammites

A, M dominants → schistes, phyllades C, D dominants → calcaires, dolomies

 Un groupe secondaire important introduit un préfixe devant le substantif de base

exemples: calc -, dol -, gréso -,

- Un minéral adjoint en faible quantité se note par un adjectif dont la désinence passe de «-fère» à «-que» quand le % augmente.
- L'origine organique ou inorganique des calcaires est révélée par les termes calcit- ou organoclast.

Granulométrie

- Les divisions sont 2 mm, 250 μ m, 60 μ m, 20 μ m.
- Pour les mélanges (Q, F, A, M) on utilise des préfixes
 Psammo, Micro (psammo), Pélito
- Pour les carbonates, on distingue la sparite, la micrite, la cryptite.

Texture

Elle peut être jointive [carbonates] ou quartzitique [QF], réticuloquartzitique ou réticulo-jointive, réticulée, empâtée.

- 1. Roches QFMA > 50% (Michot)
 - 1.1. MA = 100% péloschiste pélophyllade
 - 1.2. QMA = 100 %

Texture Ø m	Q	RQ	R	E
2 mm - 250 μm	Quartzite	Grésoquartzite	Grès	Grésoschiste
250 μ - 60 μm	psammo- quartzite	psammito- quartzite	psammite	psammoschiste
60 μ - 20 μm	micro- quartzite	micropsammito- quartzite	micro- psammite	micropsammo- schiste
< 20 μm	pélito- quartzite	pélitopsammite- quartzite	pélito- psammite	pélito- schiste

1.3. QMA +

070	F	D	C org.	C inorg.
0 - 5		_	organoclastifère	_
5 - 10	feldspathifère	dolomitifère	organoclastique	calcitifère
10 - 25	feldspathique	dolomitique	organoclastique	calcitique
> 25	arkosique*	dol -	organoclastique	calc -

Dans le cas d'une texture quartzitique, le terme quartzite est remplacé par le vocable arkose (arkose, psammarkose, micrarkose).

2. Roches CD > 50%

2.1. C = 100%

% fossiles	Texture	Ø C inorg. < 20 μm	entre 20 et 60 μm	> 60 µm
> 50%	jointive réticulo- jointive ou réticulée	calcaire organoclastique calcaire crypto organoclastique	idem micro-	idem sparo-
30-50%	empâtée	calcaire cryptitique corpusculaire	micritique corpusculaire	sparitique corpusculaire
5-30%	empâtée	calcaire cryptitique corpusculifère	micritique corpusculifère	sparitique corpus- culifère
0- 5%	empâtée	calcaire cryptitique	micritique	sparitique

2.2. C > 50%

070	Q	F	Q + F	D
0- 5 5-10 10-10	quartzifère quartzique quartzique	feldspathifère feldspathique	quartzofeldspathifère quartzofeldspathique quartzofeldspathique	dolomitifère dolomitique dolomitique

2.3. D > 50% dolomie

2.4. A 10-40% marneux

40-60% marne calcaire ou dolomitique 60-90% marne

BIBLIOGRAPHIE

- ALEXANDROV, K.S., BELIKOV, B.P., RYZOVA, T.V. (1966). Calcul des constantes élastiques des roches d'après leur composition minéralogique. *Izv. Akad. Nak SSR*, Serija Geologiceskaja, S.S.S.R. n° 2.
- 2. ARCHIMBAUD et TOURENQ, C. (1971). La gélivité des granulats routiers. Bulletin de liaison des Laboratoires routiers n° 51.
- 3. ARCHIMBAUD et TOURENQ, C. (1974). Propriétés des calcaires. Bulletin de liaison des Laboratoires routiers, n° 73.
- 4. BERNAIX, J. (1974). Propriétés des roches et des massifs rocheux. 3e Congrès Soc. intern. Méc. Roches (Denver, U.S.A.) sept. 1974, vol. 1, t.A., pp. 39-68.
- BOGISLAVSKI, M.E. et UBKO, C.A. (1969). A propos des propriétés élastiques et mécaniques de minéraux. Géologie et prospection, Moscoun° 1.
- BRACE, W.F. (1965). Relations of elastic properties of rocks to fabric. J. Geophys. Res., vol. 70, pp. 5657-5667.
- 7. Brown, E.T. et Hudson, J.A. (1971). The influence of microstructure on rock fracture on the laboratory scale, in C.R. Symp. Soc. intern. Méc. Roches, Nancy (oct. 1971), n° II-20.
- 8. Burgers, J.M. (1940). Geometrical considerations concerning the structural irregularities to be assumed in a crystal. *Proc. Phys. Soc. GB*, vol. 52, p. 23.
- CALEMBERT, L. et PEL, J. (1972). Introduction à la Géologie de l'Ingénieur. Faculté des Sciences Appliquées de l'Université de Liège. Ed. Derouaux.
- CHEVASSU, G. (1969). Influence des caractéristiques pétrographiques de quelques roches sur leur résistance à l'attrition. Bulletin de liaison des Laboratoires routiers. n° 39.

- 11. D'ALBISSIN, M. et TOURENQ, C. (1976). L'analyse des microstructures: application à la recherche des conditions de déformation des roches et à la prévision de leurs propriétés mécaniques. Revue de Géographie physique et de Géologie dynamique, vol. XVIII, fasc. 1, pp. 93-126, Paris 1976.
- DANTINNE et LONGUEVILLE (1965). Etude critique des méthodes de qualification des pierres utilisées dans les constructions routières. Mémoires du CERES. n° 10.
- 13. FOURMAINTRAUX, D. (1970). Contribution de la pétrographie à l'étude physique et mécanique des roches. Thèse de 3e cycle. Fac. Sci. Orsay, 136 pages.
- FOURMAINTRAUX, D. (1970). Interprétation minéralogique de la résistance au polissage des roches. 1^{er} congrès international de l'A.I.G.I., Paris 1970.
- 15. Griffith, A.A. (1920). The phenomena of rupture and flow in solids. *Phil. Trans. roy. Soc. London*, vol. 221, pp. 163-198.
- 16. HANKE, I. (1961). Störstellen in kalzitkristallen. *Acta Phys. Austr.*, vol. 14. pp. 1-21.
- 17. HILL, G. (1952). Le comportement élastique d'agrégats cristallins. *Proc. phys. soc. London*, vol. 65, p. 5.
- LE BERRE, P. (1975). Recherche d'une méthodologie de prospection de gisements de granulats naturels routiers, à hautes performances. Application au massif Armoricain. Thèse de 3e cycle. Univ. Paris VI, 400 p.
- LE ROUX, A. (1972). Caractéristiques mécaniques des roches argileuses en relation avec leur texture. Bulletin de liaison des Laboratoires routiers. n° 61.
- 20. L'HERMITE, R. (1971). Propriétés des Granulats Naturels destinés au béton. *Annales de l'Institut Technique*, n° 277 janvier 1971.
- 21. LOUSBERG, E. Cours de mécanique des roches. Faculté des Sciences appliquées de l'Université de Louvain.
- 22. MICHOT, P. (1958). Classification et terminologie des roches lapidifiées de la série psammopétitique. Ann. Soc. Géol. Belg., t. 81, pp. 311-392.
- de la série psammopétitique. Ann. Soc. Géol. Belg., t. 81, pp. 311-392. 23. MIELENZ, R. (1954). Petrographic examination of concrete aggregates
- 24. PIRLET, H. (1965). Classification des calcaires de la série des arénocryptites. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, t. 88, pp. 395-410.

proc. ASTM. U.S.A. 1954, vol. 54, p. 1188.

- 25. SCHNEIDER (1967). Moyens nouveaux de reconnaissance des massifs rocheux. *Annales de l'I.T.P.T.P.* Série Sols et fondations (62).
- SCHROEDER, C. (1975). Sur l'intérêt d'une définition géologique complète en mécanique des roches. Ann. Soc. Géol. Belg., t. 98, 1975, pp. 405-413.
- 27. SCHROEDER, C. et VANDEN EYNDE, P. (1978). Recherches de Géologie de l'Ingénieur sur les granulats routiers de nature sédimentaire. Engineering Geology n° 12, pp. 49-72.
- 28. STAGG, R.G. et ZIENKEWICZ, O.C. (1968). Rock mechanics in engineering practice. J. Wiley and Sons. London, New York, Sydney, 442 p.
- 29. STRUILLOU, R. (1969). Prévision de l'altérabilité des matériaux employés

- en Génie Civil. Bulletin de liaison des Laboratoires routiers n° 42.
- 30. Toureno, C. (1966). La dureté Vickers des minéraux et des roches. Bulletin de liaison des Laboratoires routiers, n° 19, pp. 1-12.
- 31. Toureno et Berthier (1970). Géologie, propriétés des roches et prospection des gisements. Les granulats. Traité théorique et pratique, fascicule II.
- 32. TOURENQ, C. et DENIS, A. (1970). La résistance à la traction. Rapp. Rech. Labo Ponts et Chaussées, n° 4, fév. 1970, 40 pages.
- 33. Toureno, C. et Fourmaintraux, D. (1971). Contribution de la pétrographie à l'étude des propriétés physiques et mécaniques des roches. *Bulletin de liaison des Laboratoires routiers*, n° 50.
- 34. VANDEN EYNDE, P. (1976). Etude de Géologie de l'Ingénieur sur les granulats utilisés en construction routière. Mémoire inédit de la Faculté des Sciences appliquées de l'Université de Liège.

Cara	ctérist	iques pétrogi	aphiques et mé	caniques d'	un type rocheux
ORIGINE E	T DÉ	NOMINATIO	ON		
carrière	п°	position stratigraphi		ctonique	dénomination
Lasneuville	La	Devillien	Massif o Stavelot		psammitoquartzite
OBSERVAT	IONS		PA	ARAMÈTR	ES RÉSULTANTS
Nature					
minéral Quartz : Feldspath : Calcite : Dolomite : Micas : Argiles : Divers :			Dn Cd E _t	oyennes arit np: 1100 : 305 k n : 925 t/ h : 5,9 ki	g/mm² /cm²
Texture					· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
de <i>quartz</i> Ø Le <i>liant</i> est c	= 100 ompos	istitué de gra	tex par	n 100 micro ture RQ ticularités:	$Dmp_{liant} = 90$
Microstruc	TURE				
$V_1 = 4,6 \text{ km}$ $E_d = 110 \text{ t/c}$ $E_e = 219 \text{ t/c}$	m² (1)		Ee	$= 0.78$ $\frac{- E_d}{E_e} = 0.$	$I_{\rm E} = 0.12$
Caractères	MACRO	SCOPIQUES			·
continuité : r porosité : c granularité: l couleur : g	nassif- compac iétérog gris-cla	ct granulaire ir, rougeâtre	orientation N45W/86NE N25E/80ESE N60E/75SE N80W/87N	qq cm 10 à 50 c 50 cm qq cm	e caractéristiques diaclases m fiss. assoc. à faille fissures fissures ouvertes
assure : i	-	latre assez irfaces	N45E/60NW	qq cm à dm	fiss. importantes à remplissage de quartz
Caractéristi	QUES N	MÉCANIQUES			
ssais sur care	ottes		essa	is sur grani	ulats
Rc = 1845 k Rtb = 280 kg J = — mm	-	, ,		= 12% $A = -$	

ORIGINE ET DÉNOMINATION

carrière	n°	position stratigraphique	unité tectonique	dénomination
Cortil	Ve	Devillien	Massif de Brabant	psammoquartzite

OBSERVATIONS

NATURE

PARAMÈTRES RÉSULTANTS

moyennes arithmétiques pondérées

minéral		%
Quartz	:	95
Feldspatl	h:	_
Calcite	:	_
Dolomite	e :	-

Dmp: 1220 kg/mm² Cd : 115 kg/mm² Eth : 950 t/cm² V_{lth} : 6.0 km/s

Ø m 150 microns

Micas : 5 Argiles : — Divers : -

TEXTURE

La texture est quartzitique, 95% de la roche est composée de grains de

texture Q $Dmp_{liant} =$ particularités: quartz de $\emptyset = 150 \mu$ macrofissuration importante les 5% restants sont des micas

MICROSTRUCTURE

$$V_1 = 4.5 \text{ km/s} (2)$$

 $E_d = 84 \text{ t/cm}^2 (1)$
 $E_c = 143 \text{ t/cm}^2 (1)$

$$I_v = 0.75$$
 $I_E = 0.09$ $\frac{E_e - E_d}{E_e} = 0.41$

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES

essais sur carottes essais sur granulats
$$Rc = 760 \text{ kg/cm}^{2} \text{ (1)} \qquad CSt = 23\%$$

$$Rtb = 243 \text{ kg/cm}^{2} \text{ (1)} \qquad CPA = --$$

$$U = --mm$$

ORIGINE ET DÉNOMINATION

carrière	n°	position stratigraphique	unité tectonique	dénomination
la Gombe	01	Famennien Fa 2b	Synclinorium de Dinant	psammarkose dolomitique

OBSERVATIONS

PARAMÈTRES RÉSULTANTS

NATURE

minéral % Quartz : 54 Feldspath: 21 Calcite: -

Dolomite: 25 Micas : -Argiles : ---Divers : -

moyennes arithmétiques pondérées

Dmp: 895 kg/mm² Cd: 390 kg/mm² Eth : 875 t/cm² V_{lth} : - km/s

TEXTURE

- Le squelette détritique est composé de 72% de grains de quartz et 28% de grains de feldspath (50 μ < \emptyset < 100 μ) - la dolomitisation secondaire prend

petites plages en agglomérats Ø 80 µ nids jusqu'à Ø 1 mm où D = 90%

Ø m 80 microns texture RQ $Dmp_{liant} = 220$ particularités: nids dolomitiques à texture

réticulée

MICROSTRUCTURE

$$V_1 = -km/s$$

 $E_d = 547 \text{ t/cm}^2$ (3)

$$E_d = 547 \text{ t/cm}^2 (3)$$

 $E_e = 557 \text{ t/cm}^2 (3)$

$$I_{v} = I_{E} = 0.63$$
 $\frac{E_{e} - E_{d}}{E} = 0.02$

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES

essais sur carottes

essais sur granulats $Rc = 3140 \text{ kg/cm}^2$ (3) CSt = 13% $Rtb = 288 \text{ kg/cm}^2$ (3) CPA = 0.57

U = 3,70 mm

ORIGINE ET DÉNOMINATION

carrière	n°	position stratigraphique	unité tectonique	dénomination
la Gombe	02	Famennien Fa 2b	Synclinorium de Dinant	psammarkose dolomitique

OBSERVATIONS

PARAMÈTRES RÉSULTANTS

NATURE

% minéral

Quartz: 63 Feldspath: 25 Calcite : -Dolomite: -

Micas : Argiles : Divers

moyennes arithmétiques pondérées

Dmp: 1010 kg/mm² Cd : 270 kg/mm²

 $E_{th}\ :\ 885\ t/cm^2$ V_{lth} : - km/s

TEXTURE

- le squelette détritique est composé de 72% de grains de quartz et de 28% de grains de feldspath (60 μ m < \emptyset < 150 μ m)

- la dolomite 5% + texture quartzitique en général (80%) «yeux» recristallisés jusqu'à 1 mm ou

D = 25%

Ø m 100 microns $Dmp_{liant} = 220$ texture Q particularités:

«yeux» dolomitiques à extinction simultanée.

MICROSTRUCTURE

 $V_1 = -km/s$ $E_d = 442 \text{ t/cm}^2 (3)$

 $E_e = 483 \text{ t/cm}^2 (3)$

 $l_v = -1_E = 0,50$

 $\frac{E_e}{E_e} = 0.08$

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES

essais sur carottes

essais sur granulats

 $Rc = 2500 \text{ kg/cm}^2 (3)$ $Rtb = 270 \text{ kg/cm}^2 (4)$

CSt = 11%CPA = 0.53

U = 2,40 mm

ORIGINE ET DÉNOMINATION

carrière	n°	position stratigraphique	unité tectonique	dénomination
Trooz	03	Famennien Fa 2b	Massif de la Vesdre	psammarkose dolomitifère

OBSERVATIONS

PARAMÈTRES RÉSULTANTS

moyennes arithmétiques pondérées

Dmp: 1050 kg/mm²

Cd : 225 kg/mm²

Eth : 890 t/cm²

 V_{lth} : — km/s

NATURE

minéral %

Quartz : 65

Feldspath: 25
Calcite: —
Dolomite: 7
Micas: 3

Argiles : —
Divers : —

TEXTURE

La texture est quartzitique à réticuloquartzitique, le diamètre moyen des grains détritiques varie de 40μ à 100μ . La dolomite est micritique, poecilitique, intersticielle et ferrifère. Les paillettes de mica ont tendance à s'aligner. Ø m 70 microns texture RQ Dmp_{liant} = 180 particularités: tendance à l'alignement des paillettes de mica

MICROSTRUCTURE

$$V_1 = -km/s$$

 $E_d = 484 \text{ t/cm}^2$ (2)
 $E_e = 504 \text{ t/cm}^2$ (2)

$$I_v = I_E = 0.54$$
 $\frac{E_e - E_d}{E_e} = 0.04$

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES

 essais sur carottes
 essais sur granulats

 Rc = 3000 kg/cm² (3)
 CSt = 11%

 Rtb = 268 kg/cm² (3)
 CPA = 0,59

 U = 3,00 mm

ORIGINE ET DÉNOMINATION

carrière	n°	position stratigraphique	unité tectonique	dénomination
Rivage	05	Famennien Fa 2 b	Synclinorium de Dinant	Micropsammarkose organo-clastique et calcitique

OBSERVATIONS

PARAMÈTRES RÉSULTANTS

NATURE

minéral %
Ouartz : 42

Feldspath: 17
Calcite: 38
Dolomite: —
Micas: 3
Argiles: —
Divers: —

moyennes arithmétiques pondérées

 $\begin{array}{lll} Dmp: & 715 \ kg/mm^2 \\ Cd & : & 565 \ kg/mm^2 \\ E_{th} & : & 860 \ t/cm^2 \\ V_{lth} & : & - \ km/s \end{array}$

TEXTURE

La texture va de quartzitique à réticu-

lée:

- le squelette détritique est composé de 72% de quartz et 28% de feldspath le ciment = calcite poecilitique sparitique (20%)

18% = débris de fossiles de 0,3 à 1 mm.

Ø m 50 microns texture RQ Dmp_{liant} = 110 particularités: barre centimétrique calcaire = 1/10ème du volume

MICROSTRUCTURE

$$V_1 = -km/s$$

 $E_d = 594 t/cm^2$ (2)

$$E_e = 598 \text{ t/cm}^2$$
 (2)

$$I_{v} = I_{E} = 0.69$$

$$\frac{E_e - E_d}{E_e} = 0.01$$

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES

essais sur carottes Rc = 1840 kg/cm² (3) Rtb = 135 kg/cm² (3)

U = 5,25 mm

essais sur granulats

CSt = 17%CPA = 0,60

ORIGINE ET DÉNOMINATION

carrière	п°	position stratigraphique	unité tectonique	dénomination
Trooz	t1	Famennien Fa 2 b	Massif de la Vesdre	psammarkose calcitique

OBSERVATIONS

PARAMÈTRES RÉSULTANTS

moyennes arithmétiques pondérées

Dmp: 915 kg/mm²

Cd : 420 kg/mm²

Eth : 880 t/cm²

 V_{lth} : 6,10 km/s

NATURE

minéral Quartz: 58 Feldspath: 22 Calcite: 15 Dolomite: -

Micas: Argiles : -Divers

TEXTURE

Le squelette détritique est constitué de 72% de quartz et 28% de feldspath Le ciment est composé de calcite et quelques micas. La texture est réticulo-quartzitique.

Ø m 100 microns

texture RQ $Dmp_{liant} = 105$

particularités: -

MICROSTRUCTURE

 $V_1 = 4,95 \text{ km/s} (6)$ $E_d = 132 \text{ t/cm}^2$ $E_e = 206 \text{ t/cm}^2 (2)$

$$I_v = 0.81$$
 $I_E = 0.15$ $E_e - E_d$ $= 0.36$

CARACTÈRES MACROSCOPIQUES

systèmes de fractures

épaisseur des bancs 15 à 50 cm orientation fréquence caractéristiques continuité : massif N85E/28SSE fissure

porosité : compact N85W/79NNE dm à 50 m fissure granularité: homogène à N75W/15SSW dm fissure grains fins N60E/80NW fissure cm N15W/24WSW dm couleur : gris-beige à fissure rougeâtre N5E/88W dm à m fissure

cassure : irrég. à

petites surf.

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES

essais sur carottes essais sur granulats

 $Rc = 1985 \text{ kg/cm}^2$ (2) CSt = 15% $Rtb = 170 \text{ kg/cm}^2 (4)$ CPA = -

ORIGINE ET DÉNOMINATION

carrière	n°	position stratigraphique	unité tectonique	dénomination
Trooz	12	Famennien Fa 2b	Massif de la Vesdre	psammarkose calcitique

OBSERVATIONS

PARAMÈTRES RÉSULTANTS

NATURE

minéral%moyennes arithmétiques pondéréesQuartz: 47Dmp : 765 kg/mm²Feldspath : 18Cd : 485 kg/mm²

Calcite : 30 E_{th} : 860 t/cm²

Dolomite : — V_{lth} : 6,15 km/s

Micas : 5 Argiles : — Divers : —

TEXTURE

Le squelette détritique est composé de 72% de grains de quartz et 28% de grains de feldspath.

Ø m 100 microns texture R Dmp_{liant} = 110 particularités: —

grains de feldspath. Le *ciment* est constitué de calcite et de quelques micas. La texture est réticulée.

MICROSTRUCTURE

$$\begin{array}{lll} V_1 = 5,55 \text{ km/s (1)} & I_v = 0,90 & I_E = - \\ E_d = -t/cm^2 & \frac{E_e - E_d}{E_e} = - \end{array}$$

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES

essais sur carottes essais sur granulats $Rc = -kg/cm^2$ $Rtb = 135 kg/cm^2(1)$ CPA = -

ORIGINE ET DÉNOMINATION

carrière	n°	position stratigraphique	unité tectonique	dénomination
Trooz	t5	Famennien Fa 2 b	Massif de la Vesdre	psammarkose calcitifère

OBSERVATIONS

NATURE

PARAMÈTRES RÉSULTANTS

moyennes arithmétiques pondérées

minéral	%
Quartz :	61
Feldspath:	24
Calcite :	10
Dolomite:	_
Micas :	05
Argiles :	
Divers :	_

Dmp: 965 kg/mm²
Cd: 385 kg/mm²
Eth: 875 t/cm²
Vlth: 6,05 km/s

TEXTURE

Le squelette détritique est constitué de 72% de grains de quartz et de 28% de grains de feldspath. Le ciment est composé de calcite. Les micas représentent 5%. La texture

Ø m 100 microns texture Q Dmp_{liant} = 105 particularités: —

est quartzitique. Microstructure

$$V_1 = 5,40 \text{ km/s} (1)$$

 $E_d = -t/\text{cm}^2$
 $E_e = -t/\text{cm}^2$

$$I_v = 0.89$$
 $I_E = -\frac{E_e - E_d}{E_e} = -\frac{1}{2}$

CARACTÈRES MACROSCOPIQUES

systèmes de fractures

épaisseur des bancs 15 à 50 cm	orientation	fréquence	caractéristiques
continuité : massif	N85E/28SSE		fissure
porosité : compact	N85W/79NNE	dm à m	fissure
granularité: homogène à	N75W/15SSW	dm	fissure
grains fins	N60E/80NW	cm	fissure
couleur : gris-beige à	N15W/24WSW	dm	fissure
rougeâtre	N5E/88W	dm à m	fissure
cassure : irrég. à			

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES

petites surf.

essais sur carottes	essais sur granulats
$Rc = 1565 \text{ kg/cm}^2 (1)$	CSt = 15%
$Rtb = - kg/cm^2$	CPA = -
U = -mm	

ORIGINE ET DÉNOMINATION

carrière	n°	position stratigraphique	unité tectonique	dénomination
Yvoir	04	Famennien Fa 2b	Synclinorium de Dinant	psammarkose calci- tifère et chloritifère

OBSERVATIONS

PARAMÈTRES RÉSULTANTS

NATURE minéral

Calcite

Quartz : 52

Feldspath: 35

: .5 Dolomite: -

Micas: 3

Argiles: 5 (chlorite)

Divers

moyennes arithmétiques pondérées

 $\begin{array}{lll} Dmp: & 955 \ kg/mm^2 \\ Cd & : & 325 \ kg/mm^2 \\ E_{th} & : & 860 \ t/cm^2 \end{array}$

 V_{lth} : -km/s

TEXTURE

Texture quartzitique

- le squelette détritique est composé de 60% de quartz et 40% de feldspath

- le ciment = calcite + chlorite

- quelques galets mous de schiste

Ø m 110 microns

texture Q $Dmp_{liant} = 95$

particularités: -

MICROSTRUCTURE

$$V_1 = -km/s$$
 (2)

 $E_d = 453 \text{ t/cm}^2 (3)$

 $E_e = 456 \text{ t/cm}^2 (3)$

 $l_{v} = - l_{E} = 0.53$

 $\frac{E_e - E_d}{-} = 0.01$

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES

essais sur carottes

essais sur granulats CSt = 12%

 $Rc = 2170 \text{ kg/cm}^2 (3)$

 $Rtb = 264 \text{ kg/cm}^2$ (4) CPA = 0.54

U = 2.10 mm

Caractéristiques pétrographiques et mécaniques d'un type rocheux ORIGINE ET DÉNOMINATION carrière n° position unité tectonique dénomination stratigraphique

Synclinorium

de l'Eifel

OBSERVATIONS

Wa Siegenien

PARAMÈTRES RÉSULTANTS

Grès

NATURE

Weywertz

minéral %

Quartz : 65
Feldspath : 3
Calcite : —
Dolomite : —
Micas : 2

: 30

moyennes arithmétiques pondérées

Dmp: 880 kg/mm²
Cd: 520 kg/mm²
Eth: 855 t/cm²
Vlth: 5,85 km/s

Divers Texture

Argiles

Le squelette détritique est constitué de grains de \emptyset 300 μ en moyenne. Le quartz en représente 95%. Le ciment

quartz en représente 95%. Le cimen contient chlorite, micas, minéraux argileux, quartz cryptogrenu. La texture est réticulée.

Ø m 300 microns texture R Dmp_{liant} = 90 particularités: —

MICROSTRUCTURE

 $V_1 = 4,20 \text{ km/s} (3)$ $E_d = 109 \text{ t/cm}^2 (2)$ $E_e = 190 \text{ t/cm}^2 (2)$ $I_{v} = 0.72$ $I_{E} = 0.13$ $\frac{E_{e} - E_{d}}{E_{e}} = 0.43$

CARACTÈRES MACROSCOPIQUES

épaisseur des bancs: 0,05 à 2 m systèmes de fractures continuité : massif - litage orientation fréquence caractéristiques diffus N10W/72W 10 cm fissures sans porosité : compact remplissage granularité: homogène à N-S/80E 40 cm fissures larges à gr. fin/moyen. remplissage de couleur : gris clair à foncé quartz : surf. larges à cassure N30W/50NE 5 cm fissures à remtend. ondulée plissage de quartz

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES

 essais sur carottes
 essais sur granulats

 Rc = 1145 kg/cm² (2)
 CSt = 24%

 Rtb = 90 kg/cm² (1)
 CPA = —

ORIGINE ET DÉNOMINATION

carrière	n,°	position stratigraphique	unité tectonique	dénomination
Weywertz	Wb	Siegenien	Synclinorium de l'Eifel	psammite

OBSERVATIONS

PARAMÈTRES RÉSULTANTS

NATURE

 minéral
 %
 moyennes arithmétiques pondérées

 Quartz
 : 75
 Dmp: 1000 kg/mm²

 Feldspath: 3
 Cd: 420 kg/mm²

 Calcite: —
 Eth: 900 t/cm²

 Dolomite: —
 Vlth: 6,05 km/s

Dolomite: — Micas : 2 Argiles : 20 Divers : —

TEXTURE

Le squelette détritique est composé de grains de quartz et de quelques feldspath (\emptyset moyen = 80μ). Le ciment contient chlorite, séricite, minéraux argileux, calcite et quartz cryptogrenu. Ø m 80 microns

texture RQ Dmp_{liant} = 90 particularités: —

MICROSTRUCTURE

$$V_1 = 4,35 \text{ km/s} (1)$$
 $I_v = 0,72$ $I_E = -\frac{1}{100}$ $I_{e} = -\frac{1$

CARACTÈRES MACROSCOPIQUES

épaisseur des bancs: 0,05 à 2 m systèmes de fractures fréquence caractéristiques continuité : massif - litage orientation diffus N15W/80NNW 2 cm diaclases porosité : compact N50W/70SW 50 cm surf. irrég. parfois granularité: homogène à remplissage de grain fin/moyen. quartz couleur : gris clair N5W/75E 1 à 20 cm remplis. de quartz : surf. assez larcassure N70E/30SE 5 à 20 cm sans remplissage ges parf. irrég. 10 à 20 cm sans remplissage N20W/65SW

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES

essais sur carottes essais sur granulats

Rc = 965 kg/cm² (1)

Rtb = - kg/cm²

U = - mm

ORIGINE ET DÉNOMINATION

carrière	п°	position stratigraphique	unité tectonique	dénomination	
Weywertz	Wc	Siegenien	Synclinorium de l'Eifel	psammite	

OBSERVATIONS

PARAMÈTRES RÉSULTANTS

NATURE

 minéral
 %
 moyennes arithmétiques pondérées

 Quartz
 : 75
 Dmp: 1000 kg/mm²

 Feldspath: 3
 Cd : 420 kg/mm²

 Calcité: Eth : 900 t/cm²

 Dolomite: Vlth : 6,05 km/s

Micas : 2
Argiles : 20
Divers : —

TEXTURE

Le squelette détritique est composé de grains de quartz (et quelques feld-spath) dont le Ø moyen = 150 µm). Le ciment contient de la séricite, de la chlorite, des minéraux argileux et du quartz cryptogrenu.

Ø m 180 microns texture RO Dmp_{liant} = 90

particularités: —

MICROSTRUCTURE

$$\begin{array}{lll} V_1 &= 3,10 \text{ km/s} (1) & I_v &= 0,51 & I_E &= - \\ E_d &= -t/\text{cm}^2 & \frac{E_e - E_d}{E_e} &= - \end{array}$$

CARACTÈRES MACROSCOPIQUES

épaisseur des bancs: 0,05 à 2 m systèmes de fractures

continuité : massif à finement lité N30W/80SW 40 cm grande ouverture porosité : compact N65E/50SE 5 à 20 cm grande ouverture granularité: homogène à N5W/75-80E 0,2 à 1 m remplis. de quartz

granularité: homogène à N5W/75-80E 0,2 à 1 m remplis. de quartz grain fin N35E/40ESE 20 à 50 cm grande ouverture couleur : gris clair à foncé

cassure : irrég. à surf. assez larges

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES

essais sur carottes essais sur granulats $Rc = -kg/cm^2$ $Rtb = 180 kg/cm^2$ (1) CPA = -

ORIGINE ET DÉNOMINATION

carrière	п°	position stratigraphique	unité tectonique	dénomination
La War- chenne	LWI	Gedinnien	Synclinorium de l'Eifel	Grès

OBSERVATIONS

PARAMÈTRES RÉSULTANTS

NATURE

minéral %

Quartz : 55

Feldspath : 5

Calcite : —

Dolomite: — Micas : Argiles : 40 Divers : —

I ARAMETRES RESCEIMING

moyennes arithmétiques pondérées

Dmp : 775 kg/mm²

Cd : 555 kg/mm²

 E_{th} : 825 t/cm² V_{lth} : 5,8 km/s

TEXTURE

Le squelette détritique est composé de grains de quartz et de quelques feld-spath (kaolinisés). Le ciment est fait de chlorite, séricite, minéraux argileux, quartz cryptogrenu. La texture est réticulée.

Ø m 500 microns texture R Dmp_{liant} = 90 particularités: macroporosité de pores

MICROSTRUCTURE

$$V_1 = 3.85 \text{ km/s} (2)$$

 $E_d = 158 \text{ t/cm}^2$
 $E_e = 260 \text{ t/cm}^2) (1)$

$$I_{v} = 0,66 I_{E} = 0,19$$

$$\frac{E_{e} - E_{d}}{E_{e}} = 0,39$$

CARACTÈRES MACROSCOPIQUES

épaisseur des bancs : 0,3 à 1 m

continuité : schistosité fruste porosité : compact

granularité: hétérogène à grain fin couleur : gris clair -

verdâtre cassure : petites surf. très irrég. systèmes de fractures

fréquence caractéristiques
dm fissure
50 cm fissure

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES

essais sur carottes essais sur granulats $Rc = 940 \text{ kg/cm}^2 (1)$ $Rtb = 50 \text{ kg/cm}^2 (2)$ CPA = - CPA = -

orientation

N10E/70W

N70W/88N

ORIGINE ET DÉNOMINATION

carrière	n,°	position stratigraphique	unité tectonique	dénomination	
La War- chenne	LW2	Gedinnien	Synclinorium de l'Eifel	psammite	

OBSERVATIONS

PARAMÈTRES RÉSULTANTS

minéral %	moyennes arithmétiques pondérée.
Quartz : 55	Dmp: 775 kg/mm ²
Feldspath: 5	Cd : 555 kg/mm ²
Calcite : —	E_{th} : 825 t/cm ²
Dolomite: —	V_{lth} : 5,8 km/s
Micas : —	
Argiles: 40	
Divers : —	

TEXTURE

Le squelette détritique est composé de grains de quartz et de quelques feld-spath. Le ciment est faite de séricite, chlorite, minéraux argileux, quartz cryptogrenu, hydroxyde de fer.

Ø m 150 microns texture R Dmp_{liant} = 90 particularités: —

MICROSTRUCTURE

$V_1 = 4.2 \text{ km/s} (4)$	$I_{v} = 0.80 \qquad I_{E} = 0.14$
$E_d = 117 \text{ t/cm}^2$ $E_c = 190 \text{ t/cm}^2 (1)$	$\frac{E_e - E_d}{E} = 0.38$
	E _e

CARACTÈRES MACROSCOPIQUES

épaisseur des bancs: 5 à 30 cm	S.	ystèmes de fr	actures
continuité : massif	orientation	fréquence	caractéristiques
porosité : compact granularité: grain fin à moyen	N25E/80ESE	dm	fiss. associées à failles de même position
couleur : gris clair verdâtre cassure : petites surf. irrégulières	N45W/80SW N20E/86W	dm dm	fissures fiss. remplies par le quartz parfois largement cristal.
	N60W/80NE	20 à 50 cm	lisé fissures ouvertes

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES

essais sur carottes	essais sur granulats
$Rc = 905 \text{ kg/cm}^2 (1)$	CSt = 24%
$Rtb = 85 \text{ kg/cm}^2 (3)$	CPA = -
U = mm	

ORIGINE ET DÉNOMINATION

carrière	п°	position stratigraphique	unité tectonique	dénomination
Marche-les- Dames	Da	Viséen VI	Synclinorium de Namur	Dolomie massive

OBSERVATIONS

PARAMÈTRES RÉSULTANTS

NATURE

minéral %

Quartz : 5

Feldspath: —

Calcite : 6

Dolomite: 87
Micas: —
Argiles: 2
Divers: —

moyennes arithmétiques pondérées

 $\begin{array}{lll} Dmp: & 265 \ kg/mm^2 \\ Cd & : & 105 \ kg/mm^2 \\ E_{th} & : & 1075 \ t/cm^2 \\ V_{lth} & : & 7,70 \ km/s \end{array}$

TEXTURE

Dolomite: Ø 150-300 μ

Calcite : Ø 200-500 μ en filonnets

et nids

Les deux minéraux sont ferrifères

Ø m 250 microns

texture RJ Dmpliant = -

particularités: -

MICROSTRUCTURE

 $V_1 = -km/s$ $E_d = 155 \text{ t/cm}^2$ $E_e = 285 \text{ t/cm}^2$ $I_v = E_e - E_d$ $E_e = 0.14$

5-15 m

CARACTÈRES MACROSCOPIQUES

épaisseur des bancs: 0,2 à 4 m continuité : massive

porosité : compacte granularité: grains fins

homogènes : gris-beige à brunâtre

: petites surf.

irrégulières

orientation

N50E-88NW

N40-70W/ 85SW

systèmes de fractures fréquence caractéristiques

failles ondulées de décrochement

avec broyage fissures associées

dm fissures asse qq m - failles avec

broyage fissures associées

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES

essais sur carottes

couleur

cassure

essais sur granulats

5-30 cm

 $Rc = 2050 \text{ kg/cm}^2$ (2) $Rtb = 153 \text{ kg/cm}^2$ (3) CSt = -% CPA = -

ORIGINE ET DÉNOMINATION

carrière	n°	position stratigraphique	unité tectonique	dénomination	
Marche-les- Dames	Db	Viséen V1	Synclinorium de Namur	Dolomie cariée	

OBSERVATIONS

PARAMÈTRES RÉSULTANTS

NATURE

minéral % moyennes arithmétiques pondérées

 Quartz : —
 Dmp : 215 kg/mm²

 Feldspath : —
 Cd : 10 kg/mm²

 Calcite : 2
 Eth :1095 t/cm²

 Dolomite : 96
 Vth : 7,85 km/s

Micas : — Argiles : 2 Divers : —

TEXTURE

Dolomite: Ø 150-200 μ ou nids Ø m 200 microns

250-300 μ texture RJ Dmp_{liant} = —

Calcite : Ø 200-300 µ particularités : intersticielle porosité de 3 à 8%.

5 à 10% de crinoïdes substitués par la dolomite

MICROSTRUCTURE

 $\begin{array}{lll} V_1 &= 5.6 \text{ km/s (3)} & I_v &= 0.71 & I_E &= 0.15 \\ E_d &= 158 \text{ t/cm}^2 & \frac{E_e - E_d}{E} &= 0.33 \\ \end{array}$

CARACTÈRES MACROSCOPIQUES

épaisseur des bancs: 0,1 à 2 m systèmes de fractures

continuité : massive orientation fréquence caractéristiques porosité : poreuse (5-20%) N40-70W/ 5-15 m failles ondulées de granularité: grain fin 85SW décrochement couleur : gris-brunâtre avec broyage à beige dm fissures associées cassure : petites surf.

re : petites surf. N50E-88NW qq m - failles avec irrégulières broyage 5-30 cm fissures associées

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES

essais sur carottes essais sur granulats

 $Rc = 1750 \text{ kg/cm}^2$ (3) CSt = --% $Rtb = 110 \text{ kg/cm}^2$ (2) CPA = --

ORIGINE ET DÉNOMINATION

carrière	n°	position stratigraphique	unité tectonique	dénomination
Marche-les Dames	Di	Tournaisien	Synclinorium de Namur	Dolomie à cherts

OBSERVATIONS

PARAMÈTRES RÉSULTANTS

NATURE

minéral Quartz : 15 Feldspath: -

Calcite: -Dolomite: -85 Micas : Argiles : -Divers

moyennes arithmétiques pondérées

Dmp: 380 kg/mm² Cd : 270 kg/mm² Eth : 1090 t/cm² V_{lth} : 7,60 km/s

TEXTURE

Chert.

Dolomie: Ø 150-300 μ, nombreux

fossiles

: partiellement recristallisé avec des nids de dolomite Ø m 200 microns

roche hétérogène

texture J $Dmp_{liant} =$ particularités:

MICROSTRUCTURE

 $V_1 = 4.21 \text{ km/s} (1)$ $E_d = 135 \text{ t/cm}^2 =$ $E_e = 217 \text{ t/cm}^2$ (1) $I_{\nu} = 0.55$ $I_{\rm E} = 0.12$ $\frac{E_e - E_d}{= 0.38}$

CARACTÈRES MACROSCOPIQUES

épaisseur des bancs: 0,2 à 1 m

continuité : massive porosité : compacte granularité: grain fin

couleur : gris-brunâtre à taches noires

cassure : petites surf. irrég. à conchoïdales

systèmes de fractures

orientation fréquence caractéristiques

N10E/77NW dm fissure associées aux failles à importantes

zones de broyage dm, rarediaclases 1 à la stratification

N55W/85NE ment cm diaclases II au N83E/19S dm, rarement cm litage

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES

essais sur carottes

essais sur granulats

CSt = -% $Rc = 1640 \text{ kg/cm}^2 (3)$ CPA = - $Rtb = - kg/cm^2$

Caractéristiques pétrographiques et mécaniques d'un type rocheux ORIGINE ET DÉNOMINATION n° carrière position unité tectonique dénomination stratigraphique Namèche Nf Viséen Synclinorium dolomie de Namur **OBSERVATIONS** PARAMÈTRES RÉSULTANTS NATURE minéral moyennes arithmétiques pondérées Quartz : Dmp: 215 kg/mm² Feldspath: — Cd : 10 kg/mm² Calcite: 5 Eth : 1095 t/cm² Dolomite: 95 V_{lth} : 7,85 km/s Micas Argiles Divers TEXTURE Dolomite Ø 100 µ Ø m 100 microns Calcite secondaire (dédolomitisation) texture J Dmp_{liant} = particularités: + fluorine Ø 0,5 à 1 mm. MICROSTRUCTURE $V_1 = 6,90 \text{ km/s} (1)$ $I_{v} = 0.88$ $E_d = -t/cm^2$ $E_e - E_d$ $E_e = - t/cm^2$ CARACTÈRES MACROSCOPIQUES épaisseur des bancs: 0,2 à 1 m systèmes de fractures continuité : massive orientation fréquence caractéristiques porosité : compacte N20E/85-88W qq dm failles et fractures granularité: grain fin associées couleur : gris, gris-foncé N55W/80-84NE qq dm failles et fractures cassure : surfaces associées irrégulières N60W/83SW dm remplissage de calcite N80W/75N 1 à 2 m remplissage de calcite EW/70S irrégularité CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES essais sur carottes essais sur granulats

CSt = -%

CPA = -

 $Rc = 1560 \text{ kg/cm}^2 (3)$

 $Rtb = 148 \text{ kg/cm}^2$ (2)

ORIGINE ET DÉNOMINATION

carrière	n°	position stratigraphique	unité tectonique	dénomination
Namèche	No	Viséen V1	Synclinorium de Namur	Dolomie

OBSERVATIONS

PARAMÈTRES RÉSULTANTS

NATURE

minéral % Quartz : -Feldspath: -

Calcite : 5 Dolomite: 95 Micas : -Argiles: -Divers : -

moyennes arithmétiques pondérées

Dmp: 215 kg/mm² Cd : 10 kg/mm² Eth : 1095 t/cm² V_{lth} : 7,85 km/s

TEXTURE

Dolomite Ø 200-400 μ - altération

nette-calcite secondaire (dédolomitisation).

Ø m 300 microns texture J $Dmp_{liant} = -$

particularités: altération nette

MICROSTRUCTURE

$$V_1 = 3.70 \text{ km/s} (4)$$

 $E_d = 141 \text{ t/cm}^2 (1)$
 $E_e = 268 \text{ t/cm}^2) (1)$

$$\frac{I_{v} = 0.47}{E_{e} - E_{d}} = 0.13$$

$$\frac{E_{e} - E_{d}}{E_{e}} = 0.47$$

CARACTÈRES MACROSCOPIQUES

épaisseur des bancs: 0,2 à 1 m continuité : massive

porosité : compacte granularité: grain fin

couleur : gris - gris-foncé cassure : surfaces

irrégulières

, \$	systèmes de fractures						
orientation	fréquence	caractéristiques					
N20E/85-88W	gg dm	failles et fractures associées					
N55W/80-	qq dm	ailles et fractures					
84NE		associées					
N60W/83SW	dm	remplissage de					

calcite N80W/75N 1 à 2 m remplissage de calcite irrégularité

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES

essais sur carottes

essais sur granulats

CSt = 33%

CPA = --

EW/70S

 $Rc = 695 \text{ kg/cm}^2$ (2) $Rtb = 83 \text{ kg/cm}^2 (3)$ U = -mm

Сага	actérist	iques pétrogr	aphiques et mé	caniques	d'un type rocheux
ORIGINE E	ET DÉI	NOMINATIO)N		
carrière	n°	position stratigraphic	unité tec que	tonique	dénomination
Beez	Ва	Viséen V2b	Syncling de Nam		Calcaire cryptitique organoclastique
OBSERVAT	TIONS		P.A	RAMÈT	TRES RÉSULTANTS
NATURE minéral % Quartz : 2 Feldspath: — Calcite : 98 Dolomite : — Micas : — Argiles : — Divers : — TEXTURE 30-70% débris d'organismes recr		Dn Cd E _t V _{lt}	moyennes arithmétiques pondérées Dmp: 135 kg/mm² Cd: 45 kg/mm² Eth: 815 t/cm² Vlth: 6,65 km/s		
lisés 20-60% calc 5-10% calc	aire cr			ticularit	1 1/4/11
MICROSTRUCTURE $V_1 = 5.03 \text{ km/s}$ $E_d = 127 \text{ t/cm}^2 (1)$ $E_e = 199 \text{ t/cm}^2 (1)$			$I_v = 0.76$ $I_E = 0.16$ $\frac{E_e - E_d}{E_e} = 0.36$		
continuité : porosité : granularité: couleur :	s bancs massif zonaire compa homog fin à p gris fo rareme	: 0,2 à 1,5 m -parf. c ct ène, gris âte ncé à noir ent gris-beige ctend.	orientation N30E/85ESE N65-70E/ 85NW N20-35W/ 70NE	fréque dm	factures ence caractéristiques fractures remplies par de la calcite fractures remplies par de la calcite dim diaclases remplies par la calcite
CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES essais sur carottes RC = 1115 kg/cm ² (1) Rtb = 154 kg/cm ² (2) U = — mm		CS	ais sur g t = 23° A = —		

ORIGINE ET DÉNOMINATION

carrière	'n°	position stratigraphique	unité tectonique	dénomination
Ourthe	Do	Tournaisien moyen	Synclinorium de Dinant	Encrinite dolomitifère

OBSERVATIONS

PARAMÈTRES RÉSULTANTS

NATURE

minéral % moyennes arithmétiques pondérées

Micas : — Argiles : 2 Divers : —

TEXTURE

50% = débris de *crinoïdes*, bordés Ø m 1000 microns d'une pellicule argileuse texture R Dmp_{liant} = 120

d'une pellicule argileuse texture R Dmp_{liant} = 120 50% = ciment sparitique en voie de dolomitisation stylolithes

MICROSTRUCTURE

 $\begin{array}{cccc} V_1 &=& -km/s & & I_{\bar{\nu}} &=& - & I_{\bar{E}} &=& 0,60 \\ E_d &=& 481 \text{ t/cm}^2 \text{ (3)} & & & \frac{E_e - E_d}{E_e} &=& 0,04 \\ \end{array}$

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES

essais sur carottes essais sur granulats

 $Rc = 1330 \text{ kg/cm}^2$ (3) CSt = 22% $Rtb = 142 \text{ kg/cm}^2$ (4) CPA = 0.47

U = 7,90 mm

ORIGINE E	T DÉI	NOMINATIO	N		
carrière n° position stratigraphiqu		unité tech ue	onique	dénomination	
Maizeret	Md	Viséen V3	Synclinor de Namu		Calcaire cryptitique organoclastique
OBSERVATIONS			PA	RAMÈTR	ES RÉSULTANTS
Nature					
minéral	%		moj	ennes arit	hmétiques pondérées
Quartz : Feldspath: Calcite :	_		Cd	p: 110 k : 5 kg/ : 810 t/	mm ²
Dolomite: Micas: Argiles: Divers:	2			: 6,65	
TEXTURE	-				
25% = matr ment 25% = calci	ice cry		irtielle- text part	300 micro ure RJ icularités: blithes	ons Dmp _{liant} = 105
Microstruc	TURE				
$V_1 = 4,95 \text{ kg}$ $E_d = 65 \text{ t/cg}$ $E_e = 97 \text{ t/cg}$	$n^{2}(1)$		$\frac{\mathbf{E_{e}}}{\mathbf{E_{e}}}$	$\frac{0.75}{E_c} = 0$	$I_{\rm E} = 0.09$
Caractères	MACRO	SCOPIQUES			
	nassif compac in, hou	nogène cé à noir purf. andes	sprientation N40W/85SW N25E/70 ESE N75E/80N N50W/80NE N20E/80-82W	dm dm dm dm dm	e caractéristiques
Caractérist	IQUES N	MÉCANIQUES			
essais sur car	ottes		essai	s sur gran	ulats
Rc = 855 kg Rtb = 117 kg	/cm ² (= 27% $= -$	

ORIGINE ET DÉNOMINATION

carrière	n°	position stratigraphique	unité tectonique	dénomination
Namèche	Na	Viséen	Synclinorium de Namur	Calcaire cryptitique organoclastique

OBSERVATIONS

PARAMÈTRES RÉSULTANTS

Nature

minéral % moyennes arithmétiques pondérées

Ouartz: 10 Dmp: 230 kg/mm² Feldspath: -Cd : 210 kg/mm² Eth : 835 t/cm² Calcite: 83

Dolomite: 5 Vlth : 6,65 km/s Micas : — Argiles : 2

Divers : -

TEXTURE

20-60% debris d'organismes recristal-Ø m 150 microns lisés Ø 100-200 μ texture R Dmpliant = 110

10-50% calcaire cryptitique particularités: -Ø 10-50 µ

35-75% calcite secondaire \emptyset 200-500 μ + dolomite

(Ø 180 μ) et quartz (Ø 60 μ)

MICROSTRUCTURE

$$\begin{array}{lll} V_1 &= 5,45 \text{ km/s} & & l_{\nu} &= 0,82 & l_{E} &= 0,16 \\ E_d &= 136 \text{ t/cm}^2 & & \frac{E_c - E_d}{E_c} &= 0,28 \end{array}$$

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES

essais sur granulats essais sur carottes CSt = -0% $Rc = 1535 \text{ kg/cm}^2$ (2)

 $Rtb = - kg/cm^2$ CPA = -U = -mm

Car	actérist	iques pétrog	raphiques et	mécan	iques d'	un type rocheux	
ORIGINE :	ET DÉI	NOMINATIO	ON				
carrière	n°	position stratigraph		tecton	ique	dénomination	
Namèche	Ne	Viséen		linoriu amur	m	Calcaire organoclastique	
OBSERVA	TIONS			PARA	MÈTRI	ES RÉSULTANTS	
Nature	-					**************************************	
	_ 93			Dmp : Cd : E _{th} :	190 kg 150 kg 820 t/	g/mm ² /cm ²	
Dolomite: Micas: Argiles: Divers:	_			V _{lth} :	6,60 k	cm/s	
TEXTURE							
	cryptos s second	en conservés grenue autou aire		texture	00 micro e RJ ilarités :	$Dmp_{liant} = 110$	
Microstru	CTURE						
$V_1 = 6.10 \text{ I}$ $E_d = -t/c$ $E_e = -t/c$	m ²)		$\frac{I_{v} = 0}{E_{e} - E_{e}}$		I _E = —	
Caractères	MACRO	SCOPIQUES					
épaisseur de	s bancs	0,5 à 1,2 m		syst	èmes de	fractures	
continuité :			orientation	,	réquence	caractéristiques	
oorosité : granularité:	moyen	ne	N20E/85-8	8W q	q dm	failles et fractures associées	
couleur :			N55W/80- 84NE	q	q dm	failles et fractures	
	assez p	lanes	N60W/83S	W d	m	associées remplissage de	
			N80W/75N	1	à 2 m	calcite remplissage de	
			EW/70S			calcite irrégularité	
Caractérist	riques N	MÉCANIQUES			_		
ssais sur ca	rottes		è	essais s	ur granu	ılats	
Rc = 1375	kg/cm ²	(4)		CSt =	-		
Rtb = 153 k	a/cm2	(5)		CPA = -			

CPA = -

Rtb = 153 kg/cm² (5) U = - mm

Caractéristiques pétrographiques et mécaniques d'un type rocheux		
ORIGINE ET DÉNOMINATION		
carrière n° position stratigraphi	unité tectonique dénomination que	
Maizeret Mc Viséen	Synclinorium Calcaire cryptitique de Namur organoclastifère	
OBSERVATIONS	PARAMÈTRES RÉSULTANTS	
Nature		
minéral %	moyennes arithmétiques pondérées	
Quartz : 2 Feldspath: — Calcite : 97 Dolomite: — Micas : — Argiles : 1 Divers : —	Dmp: 135 kg/mm ² Cd : 45 kg/mm ² Eth : 810 t/cm ² Vlih : 6,65 km/s	
Texture		
Ø 200 μ-2 mm 50-60% = matrice cryptitique partiellement recrista 25-40% = calcite secondaire Ø 100-300 μ	texture R Dmp _{liant} = 110 particularités : — allisée	
MICROSTRUCTURE		
$V_1 = 5,50 \text{ km/s } (4)$ $E_d = 165 \text{ t/cm}^2$ $E_e = 252 \text{ t/cm}^2 (1)$	$\frac{1_{v} = 0.83}{E_{e} - E_{d}} = 0.35$	
CARACTÈRES MACROSCOPIQUES		
épaisseur des bancs: 1 à 2,5 m continuité : massif porosité : compact granularité: fin couleur : gris foncé à clair cassure : surf. irrég. à tendance ehoïdale	systèmes de fractures orientation fréquence caractéristiques N40W/85SW cm à dm frac. remplies par calcite N25E/70 ESE dm frac. souvent rem- plies par calcite N75E/80N dm frac. souvent rem- plies par calcite N50W/80NE dm frac. souvent rem- plies par calcite N20E/80-82W cm à dm diacl. remplies par la calcite	
CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES		
essais sur carottes	essais sur granulats	
Rc = 1610 kg/cm^2 (2) Rtb = 135 kg/cm^2 (2)	CSt = 29% $CPA = -$	

ORIGINE ET DÉNOMINATION		
carrière n° position stratign	n unité tectonique dénomination aphique	
Namèche Nd Viséen	Synclinorium Calcaire cryptitique de Namur organoclastifère	
OBSERVATIONS	PARAMÈTRES RÉSULTANTS	
MATURE minéral % Quartz : 5 Feldspath: — Calcite : 92 Dolomite : — Micas : — Argiles : 3 Divers : — TEXTURE 25-30% = débris d'organism recristallisés 30-60% = matrice cryptogra 10-45% = calcite secondaira jusqu'à 1 mm.	texture RE	
MICROSTRUCTURE $V_1 = 5.90 \text{ km/s}$ $E_d = -t/\text{cm}^2$ $E_c = -t/\text{cm}^2$	$\frac{I_{v} = 0.89}{E_{e} - E_{d}} = \frac{I_{E} = -}{E_{c}}$	
Caractères macroscopique	es	
épaisseur des bancs: 1 à 2 m continuité : massive porosité : compacte granularité: fine à pâte couleur : gris-foncé à noir cassure : surf. irrég. à tend. conchoïdal	orientation fréquence caractéristiques N20E/85-88W qq dm failles et fractures associées N55W/80- qq dm failles et fractures 84NE associées N60W/83SW dm remplissage de calcite N80W/75N I à 2 m remplissage de calcite	
-	EW/70S irrégularité	
Caractéristiques mécaniqu	ES	
essais sur carottes Rc = 905 kg/cm ² (3) Rtb = 137 kg/cm ² (1) U = — mm	essais sur granulats CSt =% CPA =	

Caractéristiques pétrographiques et mécaniques d'un type rocheux

ORIGINE ET DÉNOMINATION

carrière	'n°.	position stratigraphique	unité tectonique	dénomination
Marche-les Dames	Dc	Viséen V1	Synclinorium de Namur	Calcaire cryptitique organoclastifère dolomi- tisé

OBSERVATIONS

PARAMÈTRES RÉSULTANTS

moyennes arithmétiques pondérées

NATURE

minéral

Dmp: 130 kg/mm² Cd : 40 kg/mm²

Ouartz: 1 Feldspath: -Calcite: 88 Dolomite: 10 Micas : -

Eth : 840 t/cm² V_{lth} : 6,75 km/s

Argiles: 1 Divers

TEXTURE

Calcite 60% calcaire cryptogrenu 40% calcite secondaire

- recristallisation Ø 20-50 μ - dans les débris de fossiles Dolomite Ø 150 µ

Ø m 20 microns $Dmp_{liant} = 110$ texture E particularités: -

MICROSTRUCTURE

$$V_1 = -km/s$$

 $E_d = 118 \text{ t/cm}^2$
 $E_e = 191 \text{ t/cm}^2$ (1)

$$I_v = I_E = 0.14$$

 $\frac{E_e - E_d}{E_e} = 0.38$

CARACTÈRES MACROSCOPIQUES

épaisseur des bancs: 0,5 à 2 m

continuité : massive porosité : compacte granularité: pâte à grain fin

couleur : gris noir

cassure : pet. surf. irrég. conchoïdales

systèmes de fractures

fréquence caractéristiques orientation 3-10 m failles ondulées N60°W/ fissures sans 0,1-2 m subvertic. remplissage fractures amples

N40°E/ 3-10 m 77-86NW

N55°W/80°NE dm

diaclases // strati rempl. de calcite

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES

essais sur carottes

essais sur granulats

CSt = -% $Rc = 1440 \text{ kg/cm}^2 (2)$ CPA = - $Rtb = 110 \text{ kg/cm}^2 (4)$

U = -mm

Car	actérist	iques pétrog	raphiq	ues et mé	caniques d	l'un type rocheux
ORIGINE E	ET DÉI	NOMINATI	ON			
carrière	п°	position stratigraph	ique	unité tec	tonique	dénomination
Maizeret	Ma	Viséen V3a	1	Synclino de Namu		Calcaire cryptitique
OBSERVAT	TIONS			PA	RAMÈTI	RES RÉSULTANTS
Nature				-		
minéral	%			mo	yennes ar	ithmétiques pondérées
Quartz: Feldspath: Calcite: Dolomite: Micas:	95 — — 3			Dn Cd E _{th}	ip: 130 : 45 k : 810	kg/mm² g/mm²
TEXTURE						
Calcaire cry un début de Calcite secon	recrist	allisation.	ıx avec	tex par	n 5 micron ture E ticularités nbreux sty	$Dmp_{liant} = 110$:
Microstruc	TURE			-		
$V_1 = 6,10 \text{ k}$ $E_d = 122 \text{ t/}$ $E_e = 244 \text{ t/}$	cm² (1)	,)			$= 0.89$ $\frac{-E_d}{E_e} = 0$	$I_{E} = 0.15$ 0.50
Caractères	MACRO	OSCOPIQUES				
épaisseur des continuité :		: 0,5 à 3 m	orien	tation	systèmes a fréquen	le fractures ce caractéristiques
porosité : granularité:			N40\	W/85SW	cm à dn	frac. remplies par
couleur :	gris for		N25E	E/70 ESE	dm	calcite frac. souvent rem-
	conch		N75E	E/80N	dm	plies par calcite frac. souvent rem-
			N50V	V/80NE	dm	plies par calcite frac. souvent rem-
			N20E	E/80-82W	cm à dn	plies par calcite diacl. remplies par la calcite
Caractérist	IQUES !	MÉCANIQUES				
essais sur car	ottes			essa	is sur grai	ıulats
Rc = 890 k Rtb = 98 kg U = mr	/cm ² (CSt	= 29% A = —	

ORIGINE E	ET DÉ!	OITANIMON	N		
carrière	n °	position stratigraphiq		tonique	dénomination
Maizeret	Mb	Viséen V3a	Synclino de Nami		Calcaire cryptitique
OBSERVA	TIONS		PA	RAMÈT	RES RÉSULTANTS
Nature					
minéral	%		mo	yennes a	rithmétiques pondérées
Quartz :	2				kg/mm ²
Feldspath:				: 45 I	
Calcite : Dolomite :				h: 810	
Micas :			.7. 10	п , о,о,	r V
Argiles :	8				
Divers :	_				
-	cite seco	secondaire ondaire Ø 20- ossiles	200 μ pa	ture RE rticularité mbreux si	
20-60% cald	cite seconis de f CTURE km/s cm ² (2	ondaire Ø 20- ossiles	200 μ pa no	= 0,91 - E _d =	s: tylolithes
20-60% calc 1 à 2% déb MICROSTRU $V_1 = 5.95$ $E_d = 70 \text{ t/s}$ $E_e = 116 \text{ t}$	cite secoris de f CTURE km/s cm² (2 /cm² (2	ondaire Ø 20- ossiles)	200 μ pa no	rticularité mbreux si	s: tylolithes
20-60% calc 1 à 2% déb MICROSTRU $V_1 = 5.95$ $E_d = 70 \text{ t/s}$ $E_e = 116 \text{ t}$	cture cture km/s cm² (2/cm² (2/cm² (2/cm² (3/cm² (3	ondaire Ø 20- fossiles) 2) OSCOPIQUES	200 μ pa no	= 0,91 - E _d =	s: tylolithes
20-60% calc 1 à 2% déb MICROSTRUG $V_1 = 5,95$ $E_d = 70 \text{ t/s}$ $E_e = 116 \text{ t}$	crite securis de f CTURE km/s cm² (2 /cm² (2 ss MACR es bance : massif	ondaire Ø 20- fossiles) OSCOPIQUES s: 0,3 à 3 m f; zonalité	200 μ pa no I _v <u>E</u> e	rticularité mbreux st $= 0.91$ $- E_{d}$ E_{e} $= systèmes$	tylolithes $I_{E} = 0,09$ $0,37$ $de\ fractures$
20-60% calc 1 à 2% déb MICROSTRUG $V_1 = 5,95$ $E_d = 70 \text{ t/c}$ $E_e = 116 \text{ t}$ CARACTÈRE épaisseur de continuité :	crite securis de f CTURE km/s cm² (2 /cm² (2 s MACR es bance massif diffus	ondaire Ø 20- fossiles) OSCOPIQUES s: 0,3 à 3 m f; zonalité e	200 μ pa no I _v <u>E_e</u>	= 0,91 - E _d E _e systèmes fréque	tylolithes IE = 0,09 0,37 de fractures ince caractéristiques
20-60% calc 1 à 2% déb MICROSTRU V ₁ = 5,95 E _d = 70 t// E _e = 116 t CARACTÈRE épaisseur de continuité : porosité granularité:	cture securis de f CTURE km/s cm² (2 /cm² (2 ss MACR es bance massil diffus compe fin	ondaire Ø 20- fossiles) OSCOPIQUES s: 0,3 à 3 m f; zonalité e act	200 μ pa no I _v <u>E</u> e	= 0,91 - E _d E _e systèmes fréque	I _E = 0,09 0,37 de fractures once caractéristiques dm frac. remplies par calcite
20-60% calc 1 à 2% déb MICROSTRUG $V_1 = 5,95$ $E_d = 70 \text{ t/s}$ $E_e = 116 \text{ t}$ CARACTÈRE épaisseur de continuité :	CTURE km/s cm² (2 /cm² (2 /cm² (3 /cm²	ondaire Ø 20- cossiles) OSCOPIQUES s: 0,3 à 3 m f; zonalité e act air à noir rrég. à	200 μ pa no I _v <u>E_e</u>	= 0,91 - E _d E _e systèmes fréque cm à c	tylolithes $I_{E} = 0,09$ $0,37$ $de fractures$ $nice caractéristiques$ $dm frac. remplies par calcite$
20-60% calc 1 à 2% déb MICROSTRU V ₁ = 5,95 E _d = 70 t/c E _e = 116 t CARACTÈRE épaisseur de continuité : porosité granularité; couleur	CTURE km/s cm² (2 /cm² (2 /cm² (2 /cm² (3 /cm²	ondaire Ø 20- cossiles) OSCOPIQUES s: 0,3 à 3 m f; zonalité e act air à noir	200 μ pa no I _v E _e orientation N40W/85SW	= 0,91 - E _d E _e systèmes fréque cm à c	IE = 0,09 0,37 de fractures ence caractéristiques frac. remplies par calcite frac. souvent rem plies par calcite frac. souvent rem
20-60% calc 1 à 2% déb MICROSTRU V ₁ = 5,95 E _d = 70 t/c E _e = 116 t CARACTÈRE épaisseur de continuité : porosité granularité; couleur	CTURE km/s cm² (2 /cm² (2 /cm² (2 /cm² (3 /cm²	ondaire Ø 20- cossiles) OSCOPIQUES s: 0,3 à 3 m f; zonalité e act air à noir rrég. à cendance	orientation N40W/85SW N25E/70 ESE	= 0,91 - E _d E _e systèmes fréque cm à c E dm	I _E = 0,09 0,37 de fractures once caractéristiques dm frac. remplies par calcite frac. souvent rem plies par calcite

CSt = 30%

CPA = -

 $Rc = 1135 \text{ kg/cm}^2 (2)$

 $Rtb = 84 \text{ kg/cm}^2 (4)$ U = -mm

	s pétrographic	ues et mécani	ques d'u	n type rocheux
ORIGINE ET DÉNOM	IINATION			
•	ition itigraphique	unité tectoni	que d	lénomination
Loyers Jb Vis	éen V3b	Synclinorium de Namur	1 C	Calcaire cryptitique
OBSERVATIONS		PARA	MÈTRES	S RÉSULTANTS
Nature				
minéral % Quartz : 2 Feldspath: —		Dmp:	135 kg/	
Calcite : 98 Dolomite : — Micas : — Argiles : — Divers : —		Cd : 45 kg/mm ² Eth : 815 t/cm ² Vlth : 6,65 km/s		n²
Texture				
Corpuscules de calcite c arrondis dans un ciment (Ø 20-200 μ) + calcite s recristallisation (Ø 50-10	de micrite econdaire de	Ø m 5 r texture particul nombre	RE D	$Omp_{liant} = 110$
Microstructure				-
$V_1 = 5.70 \text{ km/s}$ $E_d = -t/\text{cm}^2$			86 I _E	= -
$E_d = -t/cm^2$ $E_e = -t/cm^2$ (1)		$\frac{E_e - E_e}{E_e}$	_ = _	
$E_d = - t/cm^2$ $E_e = - t/cm^2$ (1)	NOUES		<u>-</u> = <u>-</u> 	
$E_d = -t/cm^2$ $E_e = -t/cm^2$ (1) CARACTÈRES MACROSCOP épaisseur des bancs : 0,3	à 3 m	E _e	- = - mes de fi	
E _d = — t/cm ² E _e = — t/cm ² (1) CARACTÈRES MACROSCOP épaisseur des bancs: 0,3 continuité: massif à zon diffuse	à 3 m nalité <i>orien</i> NO-2	Ee systè tation fre 20E/85W cm	mes de fi équence a à dm	caractéristiques fract. + calcite
E _d = — t/cm ² E _e = — t/cm ² (1) CARACTÈRES MACROSCOP Épaisseur des bancs: 0,3 continuité: massif à zon diffuse corosité: compact granularité: grain fin -	à 3 m nalité orien NO-2 N80V N35V	Systè station fre 20E/85W cm V/87N cm	mes de fi équence n à dm n à dm	caractéristiques fract. + calcite fract. + calcite fractures
E _d = — t/cm ² E _e = — t/cm ² (1) CARACTÈRES MACROSCOP épaisseur des bancs: 0,3 continuité: massif à zon diffuse porosité: compact granularité: grain fin - assez homog couleur: gris clair à beige	à 3 m nalité orien NO-2 N80V N35V gène N50E N15V	systè station fre 20E/85W cm V/87N cm V/82SW E/85SE cm V/85ENE cm	mes de fi équence a à dm a à dm a à dm a à dm	caractéristiques fract. + calcite fract. + calcite fractures fract. + calcite fract. + calcite
E _d = — t/cm ² E _e = — t/cm ² (1) CARACTÈRES MACROSCOP Épaisseur des bancs: 0,3 continuité: massif à zon diffuse borosité: compact granularité: grain fin - assez homogouleur: gris clair à beige	à 3 m nalité orien N80V N35V gène N50E N15V à ten-	Systè station fre 20E/85W cm W/87N cm W/82SW E/85SE cm W/85ENE cm 60W/ cm	mes de fi équence a à dm a à dm	caractéristiques fract. + calcite fract. + calcite fractures fract. + calcite
E _d = — t/cm ² E _e = — t/cm ² (1) CARACTÈRES MACROSCOP paisseur des bancs: 0,3 continuité: massif à zon diffuse corosité: compact granularité: grain fin - assez homog ouleur: gris clair à beige assure: surf. irrég. à dance conch	à 3 m nalité orien N800 N850 N50E N150 N50- à ten- noïdale	Systè station fre 20E/85W cm W/87N cm W/82SW E/85SE cm W/85ENE cm 60W/ cm	mes de fi équence a à dm a à dm a à dm a à dm	caractéristiques fract. + calcite fract. + calcite fractures fract. + calcite fract. + calcite
E _d = — t/cm ² E _e = — t/cm ² (1) CARACTÈRES MACROSCOP épaisseur des bancs: 0,3 continuité: massif à zon diffuse corosité: compact granularité: grain fin - assez homog couleur: gris clair à beige cassure: surf. irrég. à	à 3 m nalité orien N800 N850 N50E N150 N50- à ten- noïdale	systè station fre 20E/85W cm V/87N cm V/82SW E/85SE cm V/85ENE cm 60W/ cm	mes de fi équence a à dm a à dm a à dm a à dm	caractéristiques fract. + calcite fract. + calcite fractures fract. + calcite fract. + calcite diacl. + calcite

Caractéristiques pétrog	raphiques et méca	iniques d'ur	type rocheux		
ORIGINE ET DÉNOMINATI	ON				
carrière n° position stratigraph	unité tecto nique	onique d	énomination		
Namèche Nc Viséen	Synclinori de Namur		alcaire cryptitique		
OBSERVATIONS	PAR	AMÈTRES	RÉSULTANTS		
Nature					
minéral %	move	ennes arithn	nétiques pondérées		
Quartz : 2		: 135 kg/	<u>.</u> .		
Feldspath: —		: 45 kg/m			
Calcite: 97		: 810 t/cr			
Dolomite: — Micas : —	Vith	: 6,65 km	1/S		
Argiles : 1					
Divers : —					
TEXTURE					
60% calcaire cryptitique	Øm	10 microns			
40% calcite secondaire			$Omp_{liant} = 110$		
Ø jusqu'à 150 μ.	• .	particularités : stylolithes			
MICROSTRUCTURE					
$V_1 = 5,790 \text{ km/s} (1)$	$i_{\mathbf{v}} = i_{\mathbf{v}}$	0,87 IE	= -		
$E_d = -t/cm^2$ $E_e = -t/cm^2$	E _e -	$\frac{E_{e}-E_{d}}{E_{e}}=-$			
E _e = t/cm ²	E	e			
CARACTÈRES MACROSCOPIQUES					
épaisseur des bancs: 0,2 à 2 m	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	stèmes de f			
continuité : massive à zonalité diffuse	orientation	fréquence	-		
porosité : compacte	N20E/85-88W	q q dm	failles et fractures associées		
granularité: fine à pâte	N55W/80-	qq dm	failles et fractures		
couleur : gris clair -	84 NE	3-3	associées		
gris-foncé à noir cassure : irrégulière à	N60W/83SW	dm	remplissage de calcite		
conchoïdale	N80W/75N	1 à 2 m	remplissage de calcite		
	EW/70S		irrégularité		
Caractéristiques mécaniques	<u> </u>		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		
essais sur carottes	essai	s sur granu	lats		
$Rc = 575 \text{ kg/cm}^2 (1)$	CSt	= - %			
$Rtb = 100 \text{ kg/cm}^2 (1)$	CPA	· = -			
U = -mm					

ORIGINE ET DÉNOMINATION					
			***	M	
carrière i	n°	position stratigraphique	unité tectonique	dénomination	
Tournai I	FO	Tournaisien	Synclinorium de Namur	Calcaire micritique argilifère	
OBSERVATIO	NS		PARAMÈTI	RES RÉSULTANTS	
Nature					
minéral %			moyennes ar	ithmétiques pondérées	
Quartz : —			Dmp: 130 Cd: 20 k	kg/mm ²	
Feldspath: — Calcite : 93			Eth : 805		
Dolomite: —			V_{lth} : — km/s		
Micas :					
v	5 2 (pyrite)				
Texture					
			Ø m 20 micro	ons	
pâte micritique	pâte micritique argile diffuse en faible proportion		texture (micrite) Dmp _{liant} = 110		
argile diffuse er					
argile diffuse en fossiles très rare	es (f	ins débris)	particularités		
argile diffuse en fossiles très rare nodules de pyri	es (f te, p	ins débris)	particularités granules de p		
fossiles très rare nodules de pyri Microstructus	es (f te, p	ins débris)	granules de p	oyrite (2%)	
argile diffuse en fossiles très rare nodules de pyri $M_{ICROSTRUCTU}$ $V_{I} =$ km/s	es (f te, p RE	ins débris) parfois altérés	granules de p	Dyrite (2%) IE = 0,29	
argile diffuse en fossiles très rare nodules de pyri MICROSTRUCTUI $V_1 = -km/s$ $E_d = 236 t/cm$	es (f te, p RE	ins débris) parfois altérés	granules de p	Dyrite (2%) IE = 0,29	
argile diffuse en fossiles très rare nodules de pyri MICROSTRUCTUI $V_1 = -km/s$ $E_d = 236 t/cm$ $E_e = 307 t/cm$	es (f te, p RE	ins débris) parfois altérés)	granules de p $I_{v} = -$ $\frac{E_{e} - E_{d}}{E_{e}} = -$	Dyrite (2%) IE = 0,29	
argile diffuse en fossiles très rare nodules de pyri MICROSTRUCTU	es (f te, p RE 2 (3) 2 (3)	ins débris) parfois altérés)	granules de p $I_{v} = -$ $\frac{E_{e} - E_{d}}{E_{e}} = -$	oyrite (2%) $I_E = 0,29$ $0,23$	
argile diffuse en fossiles très rare nodules de pyri MICROSTRUCTUI V ₁ = — km/s E _d = 236 t/cm CARACTÉRISTIQUE	es (f te, p RE 2 (3) 2 (3) UES tes	ins débris) parfois altérés)) MÉCANIQUES	granules de p $I_{v} = -\frac{E_{e} - E_{d}}{E_{e}} = -\frac{E_{d}}{E_{e}}$	Solution by the contract of t	

ORIGINE E	T DÉN	NOMINATION			
carrière n° position stratigraphique		unité tectonique dénomination			
Aisemont	со	Viséen V1b	Synclinorium de Namur	Calcaire dolomitisé	
OBSERVATIONS		PARAMÈT	RES RÉSULTANTS		
Nature					
minéral	%			rithmétiques pondérées	
Quartz :	_		Dmp: 165		
Feldspath:			Cd : 55 l	kg/mm²	
Calcite :			E_{th} : 805 t/cm ²		
Dolomite:			V_{lth} : 7,3 km/s		
Micas : Argiles :	_				
Divers :					
TEXTURE					
Hétérogénéit	é impo	ortante	Ø m 75 microns		
Ø de 2 à 150			texture — Dmp _{liant} = —		
intermédiair	es		particularité	es: —	
Microstruc	TURE	· · · · · ·			
$V_1 = -km$			$I_{\mathbf{v}} = -$		
$E_d = 141 t/$			$\frac{\mathbf{E_e} - \mathbf{E_d}}{\mathbf{E_d}} = 0.32$		
$E_{e_1} = 208 \text{ t/}$	cm ²		E _e		
Caractéris	TIQUES	MÉCANIQUES			
essais sur ca	rottes		essais sur gi	ranulats	
Rc = 740 I			$CSt = 28^{\circ}$		
Rtb = 1381		2 (3)	CPA = 0.4	2	
U = 7,30	mm				

Caractérist	iques pétrographi	ques et mécaniques (d'un type rocheux
ORIGINE ET DÉI	NOMINATION		
carrière n°	position stratigraphique	unité tectonique	dénomination
Beez Bb	Viséen V2a	Synclinorium de Namur	Calcaire dolomitisé
OBSERVATIONS		PARAMÈTI	RES RÉSULTANTS
Nature			
minéral % Quartz : — Feldspath: — Calcite : 50 Dolomite : 50 Micas : — Argiles : — Divers : —		moyennes ar Dmp: 165 Cd: 55 k Eth: 805 Vlth: 7,3	g/mm ² t/cm ²
Texture			
Zones de cryptites sées en alternance a crypto-organoclasti dolomitisés, ferro-coartielle de calcite s	avec des calcaires ques intensivemen lolomie-substitution	texture — nt particularités	$Dmp_{liant} = -$:
MICROSTRUCTURE			
$V_1 = 5.0 \text{ km/s}$ $E_d = 174 \text{ t/cm}^2$ $E_e = 260 \text{ t/cm}^2$		$\frac{I_v = 0.68}{E_e - E_d} = \frac{1}{100}$	$I_E = 0.13$ 0.43
Caractères macro	OSCOPIQUES		
paisseur des bancs ontinuité : massif porosité : compa- ranularité: assez h gr. fin ouleur : gris for noir assure : gr. surf	: 0,2 à 1,2 m à zonaire orie. ct N30 étéro- à pâte N65 ncé à 85N	ntation fréquen E/85ESE dm -70E/ dm W -35W/	de fractures ce caractéristiques fractures replies par la calcite fractures remplies par la calcite diaclases remplies par la calcite
Caractéristiques i	MÉCANIQUES		
ssais sur carottes		essais sur gra	nulats
$c = 1320 \text{ kg/cm}^2$	2 (1)	CSt = 28%	

CPA = -

Rtb = $125 \text{ kg/cm}^2 (1)$

U = -mm

Caractéristiques pétrographic	ques et mécaniques d'un type rocheux		
ORIGINE ET DÉNOMINATION			
carrière n° position stratigraphique	unité tectonique dénomination		
Aisemont AO Viséen V2a	Synclinorium Calcaire oolithique de Namur		
OBSERVATIONS	PARAMÈTRES RÉSULTANTS		
NATURE minéral % Quartz : — Feldspath: — Calcite : 100 Dolomite : — Micas : — Argiles : — Divers : —	moyennes arithmétiques pondérées Dmp: 110 kg/mm² Cd: 0 kg/mm² Eth: 810 t/cm² Vlth: — km/s		
Texture réticulo-jointive - 90% = oolithes = foraminifères 150 à 600 μ - 10% = ciment sparitique grandes fissures recristallisées en calcite sparitique	Ø m 400 microns texture RJ Dmp _{liant} = 110 particularités: fissures recristallisées		
MICROSTRUCTURE $V_1 = -km/s$ $E_d = 482 \text{ t/cm}^2 \text{ (3)}$ $E_e = 540 \text{ t/cm}^2 \text{ (3)}$	$I_v = I_E = 0.56$ $\frac{E_e - E_d}{E_e} = 0.11$		
CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES essais sur carottes Rc = 1130 kg/cm ² (3) Rtb = 146 kg/cm ² (1) U = 6,80 mm	essais sur granulats CSt = 25% CPA = 0,33		

Caractéristiques pétrographiques et mécaniques d'un type rocheux

ORIGINE ET DÉNOMINATION

carrière	n°	position stratigraphique	unité tectonique	dénomination
Tournai	ЕО	Tournaisien	Synclinorium de Namur	Calcaire sparitique argilifère

OBSERVATIONS

PARAMÈTRES RÉSULTANTS

NATURE

minéral % moyennes arithmétiques pondérées

Quartz: 1 Dmp: 130 kg/mm² Cd : 25 kg/mm² Feldspath: - $E_{th}\ :\ 800\ t/cm^2$ Calcite: 87

Dolomite: - V_{lth} : — km/s Micas : -

Argiles: 10 Divers : 2 (pyrite)

TEXTURE

- quelques fossiles dans une masse Ø m 50 microns sparitique texture (sparite) $Dmp_{liant} = 110$

- argile diffuse et en filaments particularités: - granules de pyrite, parfois altérés granules de pyrite (2%)

MICROSTRUCTURE

$$\begin{array}{cccc} V_1 &=& -km/s & & & I_v &=& - & I_E &= 0,41 \\ E_d &=& 325 \text{ t/cm}^2 & & & \frac{E_e - E_d}{E_e} &= 0,14 \\ \end{array}$$

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES

essais sur granulats essais sur carottes

 $Rc = 1400 \text{ kg/cm}^2 (3)$ CSt = 21% $Rtb = - kg/cm^2$ CPA = 0.49U = 9,80 mm

Caractéristiques pétrographiques et mécaniques d'un type rocheux					
ORIGINE E	ET DÉ!	NOMINATION			
carrière n° position stratigraphique		unité tectonique dénomination			
Aisemont	ВО	Viséen V2B	Synclinorium de Namur	Calcaire micritique marneux	
OBSERVATIONS			PARAMÈTI	RES RÉSULTANTS	
Nature					
minéral	%		moyennes ar	ithmétiques pondérées	
Quartz : -			Dmp: 110		
Feldspath: Calcite :			Cd : 5 kg E _{th} : 795		
Dolomite:			V _{lth} : — k		
Micas :					
Argiles :					
Divers :	_				
TEXTURE					
La texture e	st nébu	leuse et hétérogèn	e Ø m 10 microns		
- micrite à n	nicrosp	arite (1 à 20 μ)	texture floue Dmp _{liant} = —		
 argile diffu 		•	particularités:		
 vides et rés recristallise 		le fissures alcite sparitique	stylolithes et fissures recristallisées		
Microstruc	TURE				
V ₁ := :.—. km	1/s		$I_v = - \qquad I_E = 0.69$		
$E_d = 548 \text{ t/}$			$\frac{E_{e} - E_{d}}{E_{e}} = 0.11$		
$\mathbf{E_e} = 619 \text{ t/}$	/cm ² (3	D)	$\frac{E_{e}}{E_{e}} = 0.11$		
Caractéris	TIQUES	MÉCANIQUES			
essais sur ca	rottes		essais sur gro	inulats	
Rc = 860 l	kg/cm ²	(3)	CSt = 23%	•	
Rtb = 130 I	•	(3)	CPA = 0.36	•	
U = 5,85	mm				

Caractéristiques pétrographiques et mécaniques d'un type rocheux

ORIGINE ET DÉNOMINATION

carrière	n°	position stratigraphique	unité tectonique	dénomination
Trooz	t4	Famennien	Massif de la Vesdre	marne gréseuse

OBSERVATIONS

PARAMÈTRES RÉSULTANTS

Nature				
minéral %	moyennes arithmétiques pondérées			
Quartz: 15 Feldspath: 5 Calcite: 40 Dolomite: — Micas: 5 Argiles: 35 Divers: —	Dmp: 305 kg/mm ² Cd: — kg/mm ² Eth: — t/cm ² Vlth: — km/s			

Texture

Débris d'organismes = 25%	Ø m 100 microns			
$\emptyset = 1 \text{ à 3 mm}$	texture E $Dmp_{liant} = 9$			
Grains Q, F, M $\emptyset = 50-100 \mu$	particularités: —			
Calcite inorganique $\emptyset = 100-200 \mu$				

MICROSTRUCTURE

$V_1 = -km/s$	$I_v = - I_E = -$
$E_d = - t/cm^2$	$\mathbf{E_e} - \mathbf{E_d}$
$E_e = - t/cm^2$	=

CARACTÈRES MACROSCOPIQUES

	systèmes de fractures			
épaisseur des bancs: 10 à 20 cm	orientation	fréquence	caractéristiques	
continuité: massif porosité: compact granularité: homogène à	N25E/82SW N65W/85NNE N80E/25ESE	cm à dm dm dm	diaclases cassures associées cassures associées toutes les discon- tinuités et les surf. de stratif. remplies cal. secondaire rose	

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES

essais sur carottes	essais sur granulats			
$Rc = - kg/cm^2$	CSt = 23%			
$Rtb = -kg/cm^2$	CPA = -			
U = -mm				



TABLE DES MATIÈRES

	Page
 I. GÉNÉRALITÉS 1. Les qualités exigées des granulats pour travaux de génie civil 2. Les caractéristiques intrinsèques des granulats Propriétés externes et internes Relations entre caractéristiques intrinsèques et de génie civil 	5 8
II. PROPRIÉTÉS DES MATÉRIAUX ROCHEUX ET PERFORMANCES MÉCANIQUES	
1. Propriétés des cristaux a) Nature, texture, structure cristallines b) Diagramme contrainte-déformation du cristal c) Caractéristiques quantitatives 2. Propriétés des agrégats de porosité nulle a) Agrégats monominéraux équigranulaires b) Agrégats pluriminéraux équigranulaires c) Agrégats inéquigranulaires 3. Porosité et fissuration 4. Hétérogénéité 5. Lois quantitatives Appendice: a) Propriétés des familles rocheuses b) Les granulats utilisés en Belgique c) Les granulats utilisés outre-mer	14 14 17 18 21 21 23 25 29 34 42 46 47
III. EXPÉRIENCES PERSONNELLES ET INTERPRÉTATION 1. Choix des échantillons 2. Les données pétrographiques et mécaniques 3. Les paramètres quantitatifs 4. Interprétation des résultats mécaniques a) Essais Rc Rtb Cst b) Usure et polissage	48 50 51 53 53 63
IV. CONCLUSIONS GÉNÉRALES Annexe I: Les essais mécaniques	67 74 76

