



mémento roches et minéraux industriels

les granulats

F. MAUBERT

novembre 1989
R 30157 GEO SGN 89

BRGM

Siège : Tour Mirabeau, 39-43, quai André-Citroën - 75739 Paris cedex 15, France
Tél.: (33) 1 40.58.89.00 - Télex : BRGM 780258 F - Télécopieur : (33) 1 40.58.89.33
R.C. 58 B 5614 Paris - SIRET : 58205614900419

Centre scientifique et technique :
Avenue de Concy, Orléans-La Source (Loiret) - B.P. 6009 - 45060 Orléans cedex 2, France
Tél.: (33) 38.64.34.34 - Télex : BRGM 780258 F - Télécopieur : (33) 38.64.35.18

SOMMAIRE

	Pages
INTRODUCTION	1
1. DONNEES ECONOMIQUES	2
1.1 - France	2
1.1.1 - Production globale	2
1.1.2 - Marché	5
1.1.3 - Structure de la Profession	6
1.1.4 - Consommation des granulats	7
1.1.5 - Activité extractive régionale	9
1.2 - Etranger, commerce extérieur	18
1.3 - Prix des granulats	20
2. GEOLOGIE	22
2.1 - Classement des granulats par granularité	22
2.2 - Classement des granulats par densité	22
2.3 - Classement des granulats par origine et mode de préparation	23
2.4 - Classement par nature géologique de gisement	23
2.4.1 - Les formations détritiques meubles	23
2.4.1.1 - Les alluvions des cours d'eau	23
2.4.1.2 - Les formations sédimentaires d'origine marine et continentale	25
2.4.1.3 - Les dunes et cordons littoraux	25
2.4.1.4 - Les arènes	25
2.4.1.5 - Les moraines	26
2.4.1.6 - Les éboulis de pentes	26
2.4.2 - Les formations de roches massives	26
2.5 - Critères géologiques d'exploitabilité	27
3. PRINCIPALES TECHNIQUES APPLIQUEES A LA RECHERCHE ET A L'EXPLOITATION DES GRANULATS	30
3.1 - Méthodes de prospection	30
3.1.1 - Gisement de roches massives	30
3.1.1.1 - Etude géologique	30
3.1.1.2 - Méthodes géophysiques de surface	31
3.1.1.3 - Sondages	32
3.1.1.4 - Diagraphie	33

3.1.2 - Gisements de roches meubles	33
3.1.2.1 - Photo interprétation	33
3.1.2.2 - Géophysique de surface	38
3.1.2.3 - Sondages	38
3.2 - Prix des prospections	38
4. LES ESSAIS DE GRANULATS	39
4.1 - Contrôle de granularité	41
4.2 - Test d'équivalent de sable (ES)	41
4.3 - Essai au bleu de méthylène (VB)	42
4.4 - Essai Los Angeles (LA)	42
4.5 - Essai Micro Deval en présence d'eau (MDE)	42
4.6 - Recherche des substances polluant les granulats	43
4.7 - Principaux autres essais	45
5. UTILISATIONS ET SPECIFICATIONS	47
5.1 - Utilisations	47
5.1.1 - Emplois dans le béton	47
5.1.2 - Emplois dans les mortiers	47
5.1.3 - Emplois en viabilité	48
5.1.3.1 - Couches d'assise de chaussées	49
5.1.3.2 - Couches de surface de chaussées souples	49
5.1.3.3 - Couches de surface de chaussées rigides	49
5.1.3.4 - Emplois en ballastage de voies ferrées	51
5.2 - Spécifications	51
5.2.1 - Granulats pour bétons hydrauliques et chaussées routières	51
5.2.2 - Granulats pour ouvrages SNCF	63
5.2.2.1 - Ballast	63
5.2.2.2 - Remblais techniques	64
6. METHODES D'EXPLOITATION ET DE TRAITEMENT	67
6.1 - Techniques	67
6.2 - Coût d'exploitation	69

7. MATERIAUX DE SUBSTITUTION	70
7.1 - Définitions	70
7.2 - Sous produits de carrière	70
7.3 - Calcaires tendres	71
7.4 - Sables fins	71
7.5 - Granulats de laitiers	73
7.6 - Schistes houillers	73
7.7 - Cendres volantes	73
7.8 - Granulats légers ou matériaux expansés	74
7.9 - Granulats de matériaux de démolition	74
PRINCIPALES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	76
ANNEXES	78

INTRODUCTION

Selon la norme NFP 18-101, le terme granulat réunit sous cette appellation une gamme de produits constitués par "un ensemble de grains minéraux (inertes) de dimensions comprises entre 0 et 80 mm destinés notamment à la confection des mortiers, des bétons, des couches de fondations de base et de roulement des chaussées et des voies ferrées".

Le granulat constitue après l'eau la substance minérale la plus consommée dans le monde.

La France produit annuellement plus de 350 millions de tonnes de granulats issus de roches de nature pétrographique très variée, ce qui représente environ 80 % du tonnage total des matériaux de carrière extrait du territoire national.

Matériaux pondéreux et bon marché, les ressources en granulats sont d'une manière générale largement répandues dans les couches superficielles de l'écorce terrestre et sont par conséquent exploitées à partir de multiples points d'extraction pour répondre le plus souvent à des besoins essentiellement locaux.

En France, cependant, certaines régions connaissent des difficultés croissantes d'approvisionnement en granulats en raison de contraintes qui "gèlent" une partie importante des gisements.

1. Données économiques

1.1 - FRANCE

1.1.1 - Production globale

La production française de granulats a été multipliée par 7 entre 1950 (50 Mt) et 1980 (378 Mt) avec un taux de croissance extrêmement élevé pendant les 20 premières années de cette période, lié en particulier aux développements de l'utilisation des bétons et des produits préfabriqués.

Entre 1981 et 1985 les difficultés dans le domaine de la construction ont inversé la pente de la courbe de la production qui se redresse depuis lors sans encore rattrapper les chiffres record de 1980 qui avaient atteint, compte tenu de la population nationale, une moyenne de 7 t/habitant.

Pour l'année 1987, la production nationale a été de 335 millions de tonnes (soit 6 t/habitant/an). L'estimation de la production 1988 est de 372 Mt.

Les granulats naturels proviennent de 3 grands types de gisements. Les gisements de matériaux alluvionnaires (sables et graviers fluviatiles et marins), les gisements de roches calcaires et les gisements de roches éruptives (granites, basaltes, gabbros, etc.).

58 % des granulats produits en France en 1987 sont d'origine alluvionnaire (soit 196 Mt) contre 20 % de produits calcaires (66 Mt) et 22 % de matériaux éruptifs (73 Mt).

Le pourcentage des sables et graviers d'alluvions extraits est en diminution constante depuis une vingtaine d'années au profit des matériaux calcaires tandis que la part des produits éruptifs est restée sensiblement stable autour de 20 %. A titre d'exemple la région Languedoc-Roussillon a vu son pourcentage de granulats alluvionnaires passer de 70 % en 1973 à moins de 40 % en 1987.

Au rythme de la tendance constatée, on estime que les granulats d'alluvions fluviatiles ou marins et ceux issus de roches massives (éruptives et calcaires confondues) seront exploitées au niveau national à part égale d'ici une dizaine d'année.

La production de sable et graviers tend à être considérée comme une ressource destinée essentiellement à des "usages nobles". Dans certaines régions, il est désormais interdit d'employer les produits alluvionnaires comme matériaux de remblais.

L'utilisation de granulats de roches calcaires concassées se développe rapidement dans les régions riches en matériaux de ce type, surtout lorsque les alluvions sont rares ou épuisées. Les granulats de roches éruptives ou métamorphiques concassées sont produits principalement dans des régions où elles constituent pratiquement la seule ressource. Cependant ces derniers satisfont aussi bien les marchés locaux que les marchés de viabilité plus classiques et plus éloignés.

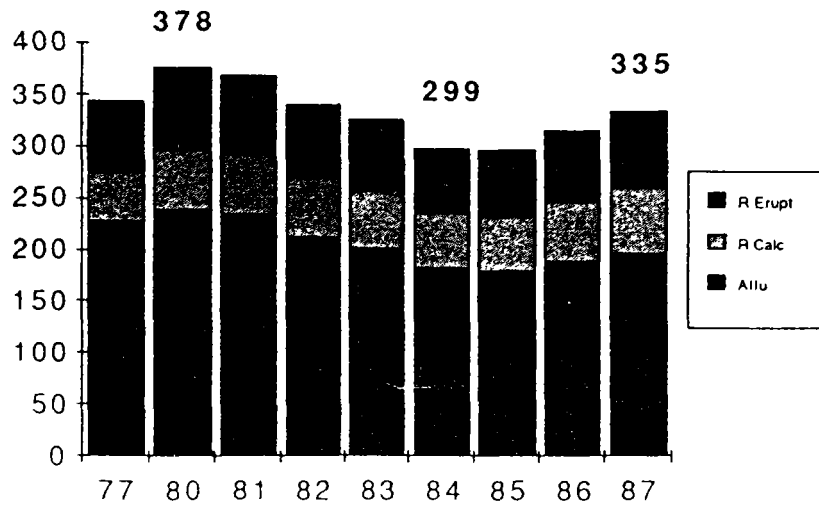


Figure 1 : Evolution de la production française de granulats par type de roche (source UNPG)

La production de granulats marins extraits du plateau continental, notamment dans les estuaires des fleuves, permet de relayer partiellement au rythme d'environ 6 Mt/an, dans certaines zones géographiques restreintes, les granulats d'origine terrestre en voie d'épuisement. Cependant l'exploitation de cette ressource est limitée tant pour des motifs économiques qu'en raison des contraintes d'environnement aussi aiguës que sur les sites terrestres. On assiste néanmoins depuis quelques mois à une relance dynamique des activités et des projets de dragage sous-marin.

Les pouzzolanes (agrégats légers) ne sont pas traités dans le cadre de ce rapport et représentent une faible part des activités extractives françaises (356 000 t en 1987).

Tableau 1 : Evolution de la production française de granulats
(Source Union Nationale des Producteurs de Granulats - UNPG)

- Toutes substances confondues en Mt

1950	1970	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987
50	277	302	326	338	320	348	345	351	358	378	369	342	327	299	294	316	335

- Par nature de granulats en pourcentage

	1970	1977	1980	1985	1986	1987
Roches alluvionnaires	68 %	66 %	63 %	61 %	59 %	58 %
Roches calcaires	12 %	14 %	16 %	19 %	19 %	20 %
Roches éruptives	20 %	20 %	21 %	20 %	22 %	22 %

1.1.2 - Marché

Le marché des granulats est, d'une façon générale, régi par deux règles économiques fondamentales :

- la lourdeur des investissements
- des coûts de transport relativement élevés, ce qui joue en faveur d'une implantation des exploitations aussi proche que possible des lieux d'utilisation.

Une installation coûte en investissement souvent plus de 2 fois son chiffre d'affaires annuel. Ce ratio est comparable à celui de l'industrie cimentière. Dans les exploitations de roche massive, on cite souvent le chiffre de 50 à 60 F d'investissement par tonne de capacité de production pour une installation nouvelle.

Tableau 2 : Statistiques 1987 - Source UNPG

Énumération des produits	Production (x 1000 t)	Livraisons (x 1000 t)
Granulats d'alluvions		
Fines o/D D < 0,08 mm	260	250
Sables o/D D ≤ 8 mm	73020	71240
Graviers et gravillons d/D 2 mm ≤ 31,5 mm	60830	58860
Cailloux et pierres cassées d/D 31,5 mm < D ≤ 80 mm	9960	9540
Blocages et enrochements 80 mm < D	920	850
Graves o/D 8 mm < D	11050	10360
Tout venant et produits de précriblage	33240	29180
Sablons	4380	4150
Produits divers non mentionnés ci-dessus	2670	2490
TOTAL	196330	186920
Granulats calcaires de carrières		
Fines o/D D < 0,08 mm	60	60
Sables o/D D ≤ 8 mm	10920	10590
Graviers et gravillons d/D 2 mm ≤ 31,5 mm	17640	16910
Cailloux et pierres cassées d/D 31,5 mm < D ≤ 80 mm	9340	8850
Blocages et enrochements 80 mm < D	3970	3880
Graves o/D 8 mm < D	8580	8470
Tout venant et produits de précriblage	14520	14050
Produits divers non mentionnés ci-dessus	800	760
TOTAL	65830	63570
Granulats éruptifs de carrières		
Fines o/D D < 0,08 mm	40	40
Sables o/D D ≤ 8 mm	10160	9600
Graviers et gravillons d/D 2 mm ≤ 31,5 mm	28880	28450
Cailloux et pierres cassées d/D 31,5 mm < D ≤ 80 mm	9710	9320
Blocages et enrochements 80 mm < D	2020	1980
Graves o/D 8 mm < D	9850	9540
Tout venant et produits de précriblage	11060	10540
Produits divers non mentionnés ci-dessus	1430	1450
TOTAL	73150	70920

La lourdeur des investissements exige une longue durée d'amortissement généralement supérieur à la décennie.

Plus de 90 % du tonnage des granulats est transporté par route, l'eau achemine 7 % de la production, le fer les 3 % restants. Le faible prix de vente des produits interdit leur transport sur de longues distances (exception faite en ce qui concerne le ballast SNCF). On estime généralement que le prix des matériaux livré par voie routière double au-delà de 40 km. En moyenne nationale, le transport pèse de plus en plus dans le coût d'une tonne de granulat. De 45 % en 1976, la part du transport est en effet passée à 55 % en 1986, soit une augmentation au rythme moyen de un point par an. Ce ratio varie sensiblement d'une région à l'autre et d'un matériau à l'autre. Ainsi, en Ile de France, le transport représente les 3/4 du coût des granulats pour enrobés contre 30 % en Bretagne. Entre 1970 et 1986, le prix des granulats rendus sur les chantiers de la région parisienne a augmenté deux fois plus rapidement que le prix des fournitures départ carrière.

En dehors des problèmes économiques qui résulteraient de l'usure du réseau routier du fait du transport des granulats, on estime qu'un éloignement supplémentaire de 30 km des installations de production par rapport aux lieux d'utilisation conduirait à une augmentation d'environ 6 % de la consommation française totale de gazole.

Les ressources locales sont le plus souvent susceptibles d'assurer les besoins techniques courants des utilisateurs. Il résulte de ces facteurs que les exploitations sont disséminées sur toute l'étendue du territoire en fonction directe de la consommation, laquelle est caractérisée par une mosaïque de "micromarchés". Les installations les plus nombreuses et aussi les plus importantes se trouvent par conséquent établies dans des zones de forte demande : agglomérations urbaines et régions industrielles qui constituent également des zones sensibles sur le plan de l'environnement.

En France, la surface de terrain "consommée" annuellement par les carrières de granulats est estimée à 5000 ha environ dont 3000 ha pour les exploitations de roches alluvionnaires.

1.1.3 - Structure de la Profession

Environ 2500 entreprises extraient du sous sol français des roches pour granulats à travers plus de 4000 points d'extraction. Ce nombre d'entreprises a peu varié au cours des 10 années précédentes. Cependant les progrès techniques industriels et le développement de l'automatisation dans les carrières se sont traduits par une réduction des effectifs de près de 30 % entre 1977 (24.300 personnes) et 1987 (17.900 personnes) parallèlement à une augmentation spectaculaire de la productivité. En effet les gains de productivité moyenne ont presque doublé en 13 ans passant de 6,6 tonnes de granulats par heure en 1973 à 12,6 tonnes/heure en 1987.

Les granulats sont principalement exploités par des petites et moyennes entreprises. Plus de 2300 entreprises de carrière emploient moins de 20 salariés.

Cependant la Profession fait l'objet depuis ces dernières années d'un mouvement de concentration industrielle surtout significatif dans le périmètre des grandes métropoles urbaines et qui tend également à s'étendre par des prises de participation en capital ou des rachats d'entreprises vers des centres de moindre importance.

Le chiffre d'affaires global des sociétés productrices de granulats a plus que doublé entre 1977 (4,7 milliards F) et 1987 (10,8 milliards F).

Les 35 premières entreprises appartenant à la branche industrielle des producteurs de granulats et qui commercialisent annuellement plus de 1 million de tonnes de produits réalisent moins du quart de la production nationale.

En France, les plus importants producteurs de granulats sont pour la plupart affiliés à des grands groupes de cimentiers, de fabricants de béton ou d'entrepreneurs de travaux publics (cf. tableau 5).

A l'amont, l'industrie de la production des granulats est le client principal (par ses investissements et sa consommation courante) des constructeurs de matériels lourds et comme fabricants d'explosifs. A l'aval, elle est le fournisseur essentiel, comme l'industrie cimentière, des industries du béton prêt à l'emploi et du béton manufacturé.

Sa contribution indispensable aux secteurs du Bâtiment et des Travaux Publics qui emploient 1.200.000 personnes soit 8 % de la population active du pays, permet de percevoir toute son importance dans l'activité économique nationale.

A titre d'exemple, les granulats représentent en tonnage le tiers des transports routiers, les deux cinquièmes du fret convoyé par voie d'eau (région parisienne essentiellement) et le vingtième des marchandises acheminées par voie ferrée.

1.1.4 - Consommation des granulats

Les granulats constituent le matériau de base le plus important dans la Construction et les Travaux Publics :

- dans le domaine des Travaux Publics, la création et la réfection des routes sont principalement réalisés en utilisant des sables et graviers concassés de diverses origines
- dans le secteur de la construction et pour les ouvrages d'art, le matériau le plus utilisé du fait notamment de ses performances techniques et de son faible prix est aujourd'hui le béton, mélange de 85 % de granulats et 15 % de ciment (hors eau de gâchage).

En 1987 la consommation française en granulats a été de 328 Mt (sur 335 Mt produites). L'écart de 7 Mt s'explique essentiellement par le solde des importations-explorations. Cette consommation est inégalement répartie entre les ouvrages du Génie civil 73 % (soit 239 Mt) et ceux du Bâtiment 27 % (89 Mt).

Les voieries (routes, autoroutes, ballast ferroviaire) représentent plus des 2/3 des utilisations du Génie civil.

Les bétons et produits en béton absorbent près de 36 % de la consommation nationale se répartissant en 2 classes :

- les bétons hydrauliques préparés directement sur les chantiers, ou élaborés à partir de centrales à béton prêt à l'emploi (B.P.E.)
- les bétons manufacturés pour la confection de blocs, tuiles, poutrelles, panneaux de façade, tuyaux, bordures...

Les 64 % des granulats restant sont consommés soit en béton bitumineux, soit utilisés sans aucun additif : graves, sables, enrochements, ballasts.

Classiquement les consommations élémentaires moyennes en granulats estimées pour quelques ouvrages "étalons" sont les suivantes :

- un logement : 150 à 200 t ;
- un kilomètre d'autoroute neuve : 30000 t ;
- un kilomètre de route : 12000 t ;
- un kilomètre de voie ferrée (double voie) : 16000 t ;
- une centrale nucléaire (4 tranches) : 6 à 12 Mt ;
- ballast SNCF : 5 Mt/an
- enrochements d'endiguement : 16 Mt/an.

Selon leur origine, les granulats ont des gammes d'utilisations spécifiques ou tout au moins privilégiées induites par leurs caractéristiques physiques. En effet, les granulats d'alluvions sont les plus recherchés pour la fabrication des bétons hydrauliques, notamment par la qualité des éléments fins qu'ils contiennent. Les granulats de roches calcaires concassées s'emploient surtout dans les assises routières mais certaines catégories de ce matériau tendent le plus souvent à être utilisées dans les bétons hydrauliques, notamment dans les régions qui présentent un déficit en matériaux alluvionnaires.

Grâce à leurs qualités spécifiques de résistance mécanique connues de longue date, les granulats concassés de roches éruptives sont particulièrement appréciés pour fournir du ballast de voie ferrée et pour la construction et l'entretien des couches d'usure des chaussées routières, lesquelles autorisent des transports sur des distances relativement élevées en raison, notamment à la tarification particulière établie par la SNCF.

1.1.5 - Activité extractive régionale

Si, globalement la production nationale de 1987, sensiblement revenue à son niveau de 1974, semble indiquer une apparente stabilité à l'échelle nationale, dans le détail, la comparaison des données statistiques régionales fait apparaître des évolutions très variables d'une région à l'autre au cours des 13 dernières années.

En effet, certaines régions ont connu une baisse de production très importante (45 % pour l'Ile de France). D'autres, au contraire ont développé leur activité extractive en granulats dans des proportions considérables (près de 45 % d'augmentation pour la région Languedoc-Roussillon, 32 % en Midi-Pyrénées).

La plupart des régions assurent au moins 90 % de leur approvisionnement à partir de leurs propres ressources. La principale exception concerne l'Ile-de-France, dont le déficit est de l'ordre de 40 % de la consommation, et encore, dans ce cas, le déficit est-il comblé par des régions limitrophes. Outre ces flux liés à des déficits quantitatifs, du fait de l'épuisement des ressources, ou plus souvent, de la limitation des possibilités d'ouverture de nouvelles carrières (dans le domaine des granulats alluvionnaires notamment), on observe au niveau national d'importants flux liés à des phénomènes qualitatifs. Il s'agit, soit d'échanges réciproques, entre régions proches permettant un rééquilibrage des ressources par rapport aux besoins (cas de la Picardie, qui livre des matériaux alluvionnaires dans la région du Nord, et qui reçoit en retour des granulats calcaires), soit de flux sur de longues distances, correspondant le plus souvent à des besoins spécifiques à usage routier (couche de surface), et concernant donc plutôt les granulats de roches massives.

Tableau 3 : Données générales sur la Profession (source UNPG)

	1977	1987	% 87/77
Chiffre d'affaires HT. (milliards F)	4,7	10,8	+ 130
Nombre d'entreprises	2500	2500	0
Effectifs	24300	17900	- 47
Heures travaillées (en milliers)	43200	26600	- 38
Productivité = Tonnes/effectif	14200	18700	+ 32
Tonnes/heure	8	12,6	+ 57
Tonnes par habitant	6,5	6	- 7,7

Tableau 4 : Les entreprises par classe de production (Source UNICEM)

Classes de production en 1000 t		Entrep Nb	Prod en 1000 t	Prod %
Alluvionnaire	1000 et plus	17	39500	20
	500 et plus	81	82700	42
	250 et plus	200	124400	63
	100 et plus	481	169400	86
	1 et plus	1439	196300	100
Roches calcaires	1000 et plus	8	12600	19
	500 et plus	26	25200	38
	250 et plus	66	39700	60
	100 et plus	169	57300	87
	1 et plus	446	65800	100
Roches éruptives	1000 et plus	9	20500	28
	500 et plus	33	35600	49
	250 et plus	82	52100	71
	100 et plus	176	67000	92
	1 et plus	365	73100	100

328 Millions de tonnes

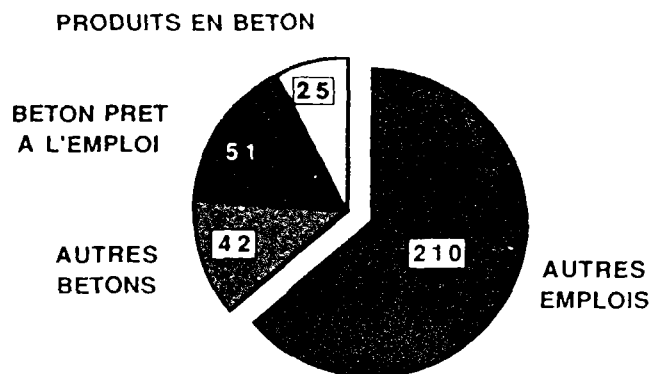
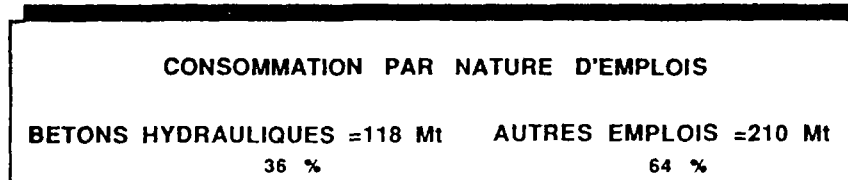
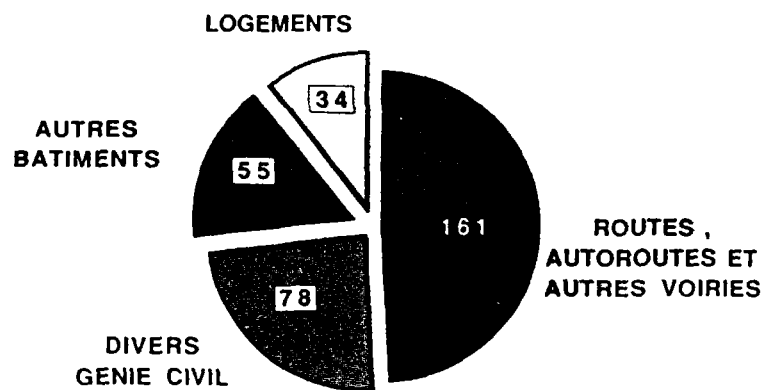
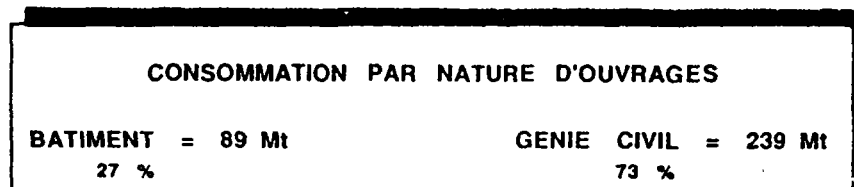


Figure 2 : Consommation française de granulats 1987 (source UNPG)

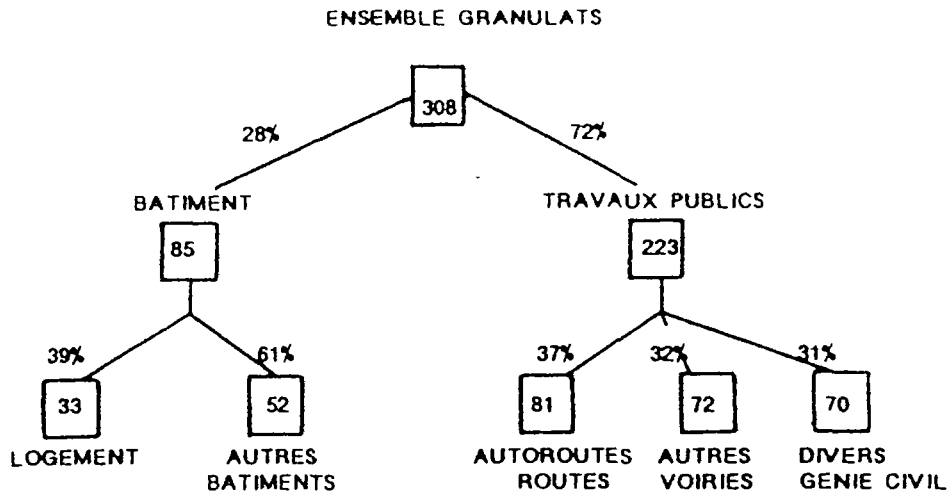


Figure 3 : Consommation de granulats (année 1986)
Répartition par catégorie d'ouvrages (estimation en Mt)

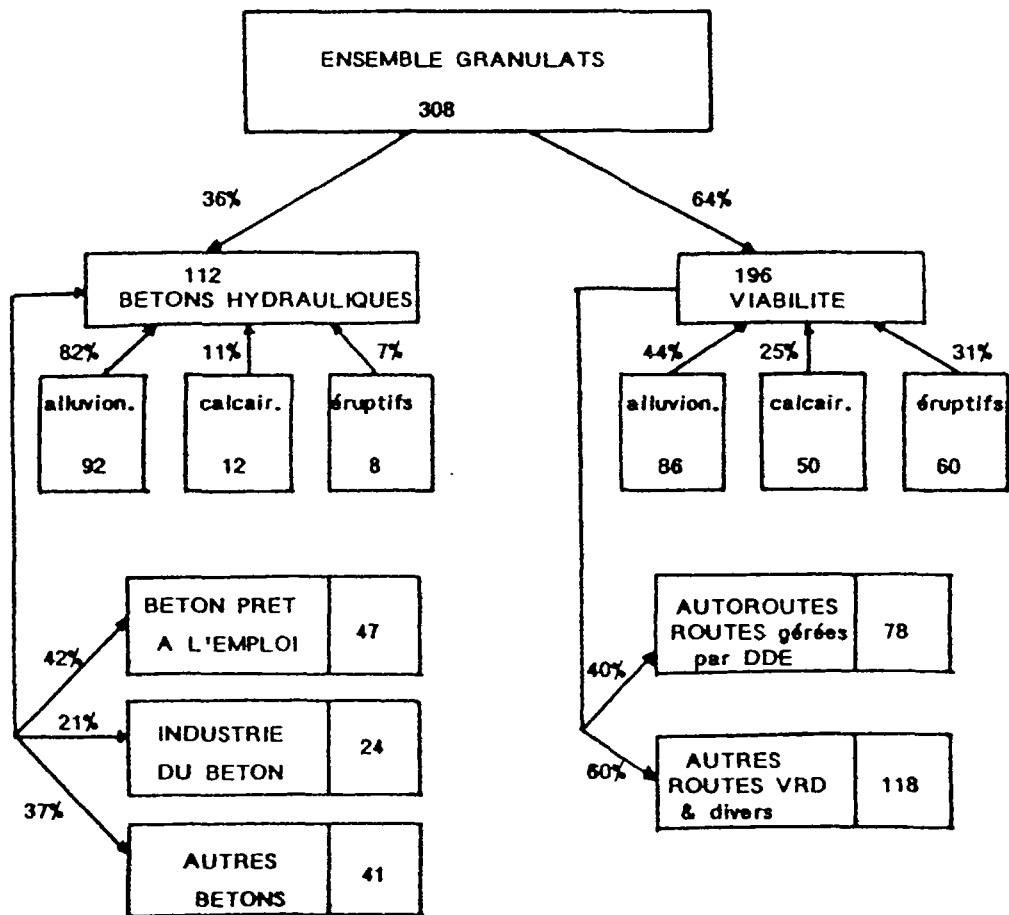


Figure 4 : Consommation de granulats (année 1986)
Répartition par catégories d'emplois et types de granulats
(Source UNPG)
(estimation en Mt)

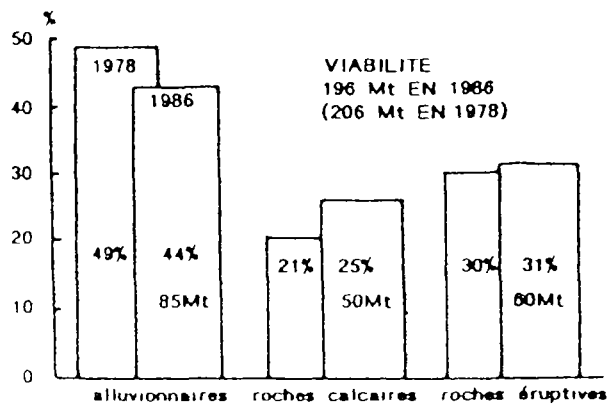
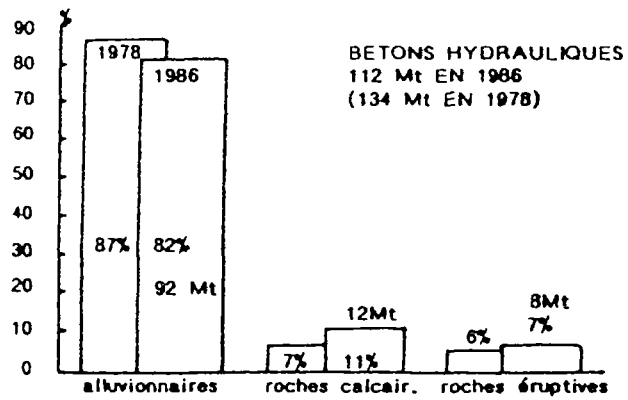


Figure 5 : Evolution de la consommation de granulats
(par catégorie d'emplois et types de granulats)
(Source UNPG)

Tableau 5 : Quelques uns des principaux exploitants de granulats
(Source principale - Le Moniteur 1989)

Groupe ou société indépendante	Principale(s) filiale(s) (TP ou granulats)	Production du groupe 1988 (millions t)	Nombre de carrières
. Ciments Français	G.S.M.	25	80
. Steetley	Garon-Bedel	25	50
. Ciments Lafarge	CSS	23,8	84
. Jean Lefebvre	-	15	
. R.M.C.	Morillon Corvol	13	46
. Bouygues	Colas, SCREG	10	
. Ciments Vicat		6	
. Pigeon			
. Générale des eaux	Viafrance, Cochery, Bourdin et Chaussées		

Tableau 6 : Evolution des productions régionales de granulats en 15 ans
(Source UNPG)

(Millions de T.)	1973	1987	Evolution 1973-1987 (en %)
Ile-de-France	32.4	17.7	- 45 %
Picardie	11.1	10.2	- 8 %
Alsace	25.5	24	- 6 %
Normandie	27.4	24.7	- 10 %
Limousin	4.4	4	- 9 %
Centre	14.8	16.3	+ 10 %
Provence	29.3	28.9	- 1 %
Champagne	7.3	7.5	+ 3 %
Poitou-Charente	12.3	14.6	+ 19 %
Pays de la Loire	24.3	26.1	+ 7 %
Auvergne	7.8	9.1	+ 17 %
Bretagne	18.1	19,6	+ 8 %
Lorraine	11.4	10.9	- 3 %
Nord	10.3	12.3	+ 19 %
Bourgogne-Franche-Comté	20.2	21.7	+ 7 %
Midi-Pyrénées	14.9	19.6	+ 32 %
Rhône-Alpes	31.5	36.0	+ 14 %
Languedoc	11.1	16.3	+ 47 %
Aquitaine	14.2	15.9	+ 12 %
Total	328.3	335	+ 11 %

Tableau 7 : Production française de granulats par département en 1987
(Source UNPG)

N°	DEPARTEMENTS	PROD.	% Allu	N°	DEPARTEMENTS	PROD.	% Allu
1	AIN	5,0	93%	49	MAINE & LOIRE	6,0	32%
2	AISNE	3,3	100%	50	MANCHE	3,4	13%
3	ALLIER	2,9	41%	51	MARNE	2,4	100%
4	ALPES DE Hte P.	1,3	89%	52	Hte MARNE	1,6	15%
5	Htes ALPES	1,0	86%	53	MAYENNE	3,1	14%
6	ALPES MARITIMES	6,2	37%	54	MEURTHE & MOS.	4,6	95%
7	ARDECHE	0,8	61%	55	MELUSE	0,7	83%
8	ARDENNES	1,4	36%	56	MORBIHAN	4,2	24%
9	ARIEGE	1,3	83%	57	MOSELLE	1,9	85%
10	AUBE	2,2	93%	58	NIEVRE	2,4	46%
11	AUDE	1,3	65%	59	NORD	6,3	26%
12	AVEYRON	2,0	13%	60	OISE	5,0	96%
13	BOUCHES DU RH.	10,3	41%	61	ORNE	2,1	10%
14	CALVADOS	5,1	17%	62	PAS DE CALAIS	6,1	16%
15	CANTAL	1,3	33%	63	PUY DE DOME	3,5	62%
16	CHARENTE	3,4	21%	64	PYRENEES Atl.	3,6	42%
17	CHARENTE Mme	2,1	55%	65	Htes PYRENEES	2,4	60%
18	CHER	2,1	68%	66	PYRENEES Orient.	2,9	45%
19	CORREZE	1,3	47%	67	BAS RHIN	17,3	97%
20	CORSE	1,5	78%	68	HAUT RHIN	6,7	98%
21	COTE D'OR	3,4	35%	69	RHONE	8,9	83%
22	COTE DU NORD	4,7	3%	70	Hte SAONE	2,7	57%
23	CREUSE	0,6	3%	71	SAONE & LOIRE	4,2	42%
24	DORDOGNE	2,8	28%	72	SARTHE	3,3	58%
25	DOUBS	3,2	20%	73	SAVOIE	2,4	71%
26	DROME	4,0	98%	74	Hte SAVOIE	5,1	74%
27	EURE	9,2	100%	75	PARIS	0	-
28	EURE & LOIR	3,3	57%	76	SEINE MARITIME	5,0	100%
29	FINISTERE	5,3	11%	77	SEINE & MARNE	10,9	89%
30	GARD	4,0	57%	78	YVELINES	4,3	100%
31	Hte GARONNE	6,7	99%	79	DEUX SEVRES	7,0	-
32	GERS	0,8	76%	80	SOMME	1,9	100%
33	GIRONDE	4,6	100%	81	TARN	3,1	39%
34	HERAULT	7,6	24%	82	TARN & GARONNE	2,3	70%
35	ILLE & VILAINE	5,4	25%	83	VAR	5,9	20%
36	INDRE	1,4	21%	84	VALCLUSE	2,8	93%
37	INDRE & LOIRE	1,7	85%	85	VENDEE	5,6	11%
38	ISERE	7,4	98%	86	VIENNE	2,1	73%
39	JURA	1,8	41%	87	Hte VIENNE	2,2	5%
40	LANDES	2,6	89%	88	VOGES	3,8	57%
41	LOIR & CHER	2,7	72%	89	YONNE	3,0	83%
42	LOIRE	2,5	56%	90	TERR. de BELFORT	1,0	16%
43	Hte LOIRE	1,4	38%	91	ESSONNE	0,8	100%
44	LOIRE ATLANT.	8,2	32%	92	Hts de SEINE	0	-
45	LOIRET	5,1	83%	93	SEINE St DENIS	0	-
46	LOT	1,1	38%	94	VAL DE MARNE	0	-
47	LOT & GARONNE	2,4	87%	95	VAL D'OISE	1,7	100%
48	LOZERE	0,5	32%				

Production en millions de tonnes

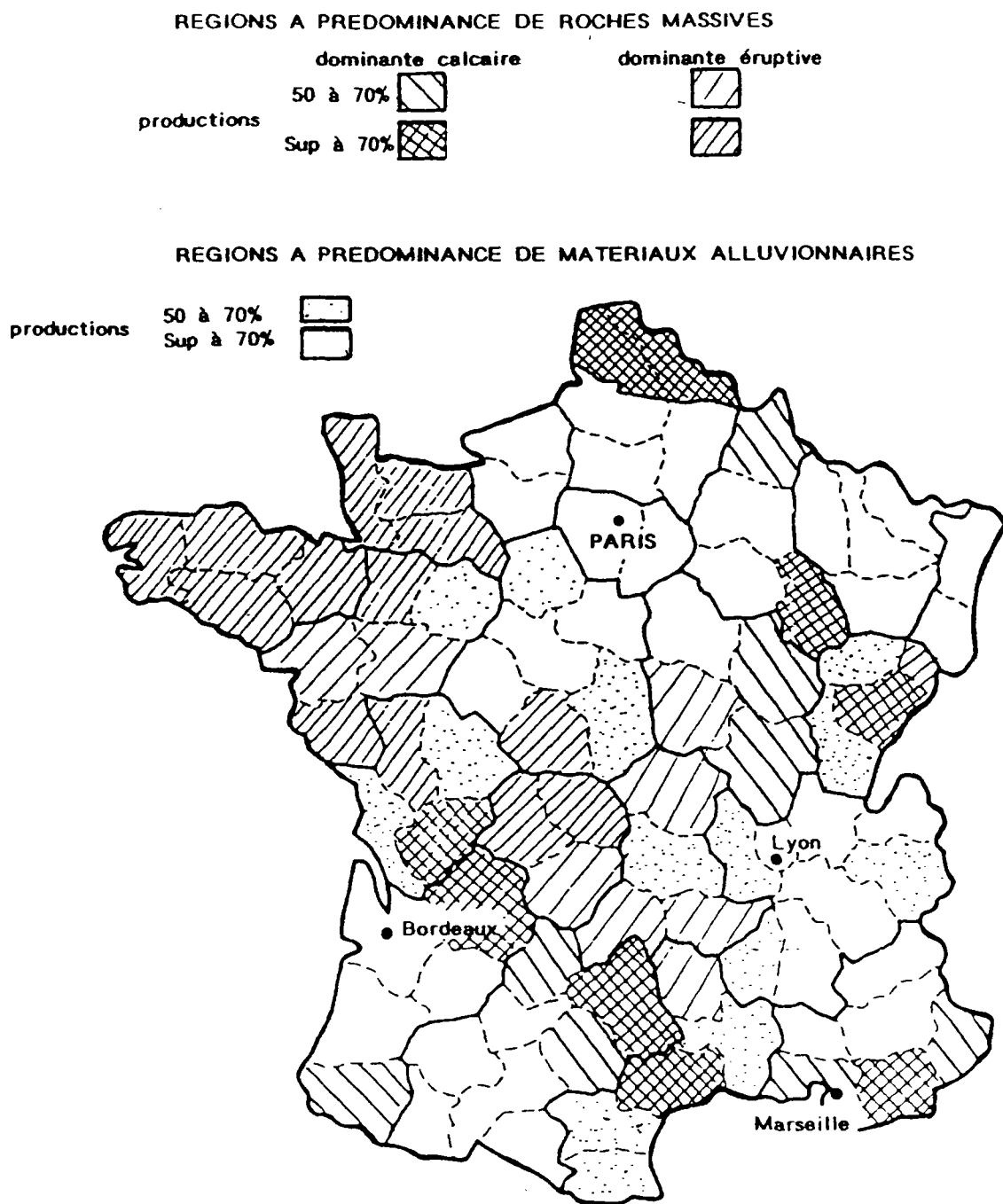


Figure 6 : Répartition géographique des productions de granulats en 1986
(Source UNPG)

1.2 - ETRANGER, COMMERCE EXTERIEUR

Les statistiques de production de granulats sont souvent difficiles à obtenir et à comparer en particulier dans la mesure où la définition française du terme "granulat" (cf. introduction) n'est pas universellement adoptée. Les données suivantes déjà anciennes et approximatives, doivent donc être interprétées avec prudence.

Pour 1984 la production de granulats dans quelques pays industrialisés a été la suivante en Mt :

	Mt	t/hab.
USA	1900	8,2
URSS	2000 (estimation)	(?)
JAPON	800	6,8
RFA	490	7,9
FRANCE	300	5
CANADA	270	10,8
ROYAUME UNI	220	3,9
SUISSE	70	10,9
PAYS BAS	60	4,2
BELGIQUE	43	4,4

Au cours de la dernière décennie, les importations et exportations françaises de granulats sont restées extrêmement stables et n'ont pas subi les fluctuations de la production nationale.

La balance commerciale française est excédentaire avec près de 3 fois plus de granulats exportés par rapport aux produits importés.

En moyenne, la France exporte annuellement de l'ordre de 12,5 millions de tonnes de granulats par an contre 4,9 millions de tonnes de matériaux importés. La France reçoit principalement des produits calcaires et exporte essentiellement des matériaux alluvionnaires.

Ramenés à l'ensemble des tonnages transportés, ces flux sont faibles (moins de 5 %). Toutefois, ces échanges essentiellement frontaliers sont tout à fait significatifs pour les départements et régions concernés.

Le secteur des granulats paraît relativement moins concerné que d'autres par l'échéance européenne de 1992, en raison de ce faible niveau d'échanges. Cette échéance peut néanmoins accélérer les mutations en cours :

- concentration d'entreprises à l'échelon communautaire ;
- internationalisation du financement ;
- harmonisation en matière de qualité, normalisation, structure des coûts...

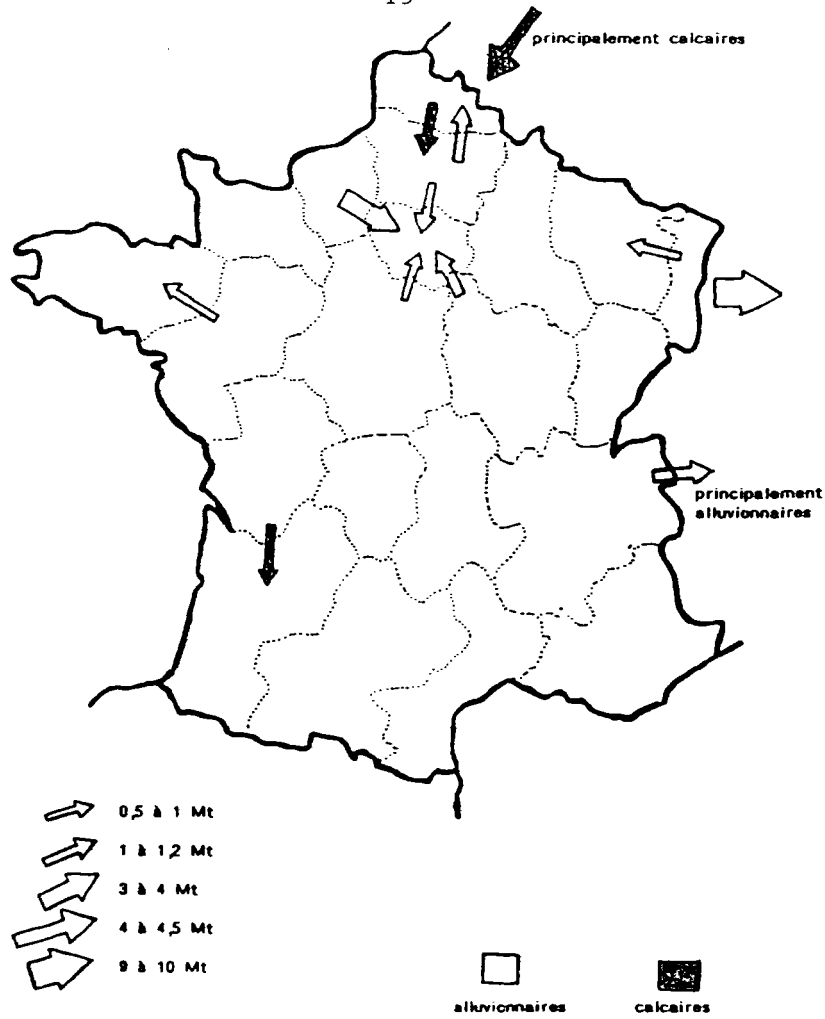


Figure 7 : Flux inter-régionaux et commerce extérieur en 1986 (alluvionnaires et calcaires) Source UNPG

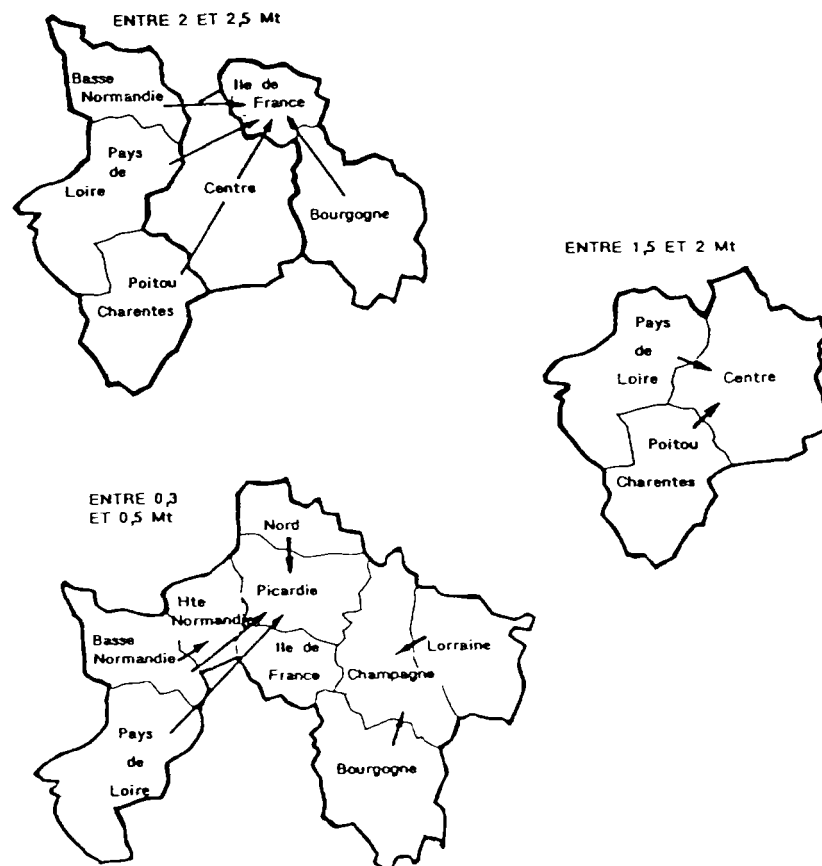


Figure 8 : Flux inter-régionaux (éruptifs) en 1986 - Source UNPG

Tableau 8 : Exportations et Importations Françaises de granulats (en Mt)
(Source UNICEM)

PRODUITS	EXPORTATIONS 1987		IMPORTATIONS 1987	
	Tonnes	Valeur en 1000F	Tonnes	Valeur en 1000F
<u>1501 et 1502 - GRANULATS</u>				
Calcaires concassés (viabilité)	169 299	7 131	2 150 495	86 308
Autres pierres concassées (viabilité)	112 870	3 381	590 456	36 657
Macadam, tarmacadam	15 257	2 473	76 614	14 396
Cailloux, graviers	5 568 030	159 077	464 620	12 596
Autres graviers ou concassés	3 048 952	135 435	263 923	27 621
Sables de construction	2 586 778	81 480	1 533 750	67 468
TOTAL	11 501 186	388 977	5 079 858	245 046

	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987
Exportations	13,2	13,9	13,9	12,8	12,5	12,3	11,2	11,5	12,2	11,5
Importations	4,5	4,7	5,5	5,4	5,5	4,9	4,4	4,9	4,9	5,1

1.3 - PRIX DES GRANULATS

Les granulats constituent un ensemble de produits bon marché dont le poids influe en général assez peu sur le coût global de la construction.

Pour 1987, dans les 3 grandes catégories de granulats, les prix moyens départ carrière (calculé sur la base du rapport chiffre d'affaires/production) étaient les suivants :

- sables et graviers d'alluvions 33,58 F/t (HT)
- granulats calcaires 29,25 F/t (HT)
- granulats éruptifs 37,49 F/t (HT)

Le prix de vente des produits d'origine éruptive, légèrement plus élevé que celui des autres catégories de matériaux, est justifié par un coût d'exploitation également plus important (nécessité d'utiliser l'explosif, usure du matériel...).

Pour le Bâtiment, les agrégats représentent environ 3 % du prix de revient technique du logement.

Rapporté au prix global d'un logement neuf de 500 000 F, on estime qu'une hausse actuelle de 10 % du prix des granulats rendus sur chantier entraînerait une augmentation du coût du logement de l'ordre de 1^o/_{oo} (soit environ 1000 F) compte tenu du nombre important de composants entrant dans le calcul de la valeur totale (foncier, gros oeuvre, produits de second oeuvre...). Dans le domaine routier, l'impact d'une variation du prix des granulats sur le coût des ouvrages se manifeste d'une manière plus directe. Ils entrent en effet pour 30 % environ dans le prix de revient des chaussées neuves et pour 6 % dans celui des ouvrages de Génie Civil.

2. Géologie

Les formations géologiques susceptibles de recéler des gisements de roche aptes à la confection de granulats sont extrêmement multiples compte tenu notamment de la diversité des produits naturels ou artificiels regroupés sous cette appellation technique.

Les granulats sont généralement classés selon différents critères qui sont principalement : la granularité, la masse volumique, l'origine et le mode de préparation.

Parallèlement, compte tenu de l'organisation de la profession des producteurs de granulats, on distingue généralement ces matériaux en fonction de critères géologiques simples liés à la nature des gisements :

- les gisements situés dans les formations détritiques meubles : granulats alluvionnaires,
- les gisements de roches massives eux-mêmes habituellement divisés par la Profession en gisements de granulats calcaires et gisements de granulats d'origine éruptive.

2.1 - CLASSEMENT DES GRANULATS PAR GRANULARITE

La granularité ou distribution dimensionnelle des grains est définie par la norme NF P 18-101 qui distingue par granularité croissante :

- les fines (dimensions inférieures ou égales à 0,08 mm soit 80 μ m)
- les sables (plus petite dimension : d = 0,08 mm)
(plus grande dimension : D = 6,3 mm)
- les gravillons (d = 1 mm)
(D = 31,5 mm)
- les cailloux (d = 20 mm)
(D = 80 mm)
- les graves (d = 6,3 mm)
(D = 80 mm)
- les enrochements (très variable).

Les coupures granulométriques entre les différents produits ne sont pas rigoureuses, elles peuvent varier selon les techniques d'utilisation et les origines de production.

2.2 - CLASSEMENT DES GRANULATS PAR DENSITE

(selon les normes NF P 18-309, NF P 18-554 et NF P18-555)

D'après leur masse volumique les granulats sont dits :

- granulats légers lorsque la masse volumique réelle du grain est inférieur à 2 g/cm³
- granulats courants lorsqu'elle est comprise entre 2 et 3 g/cm³
- granulats lourds lorsqu'elle est supérieure à 3 g/cm³.

2.3 - CLASSEMENT DES GRANULATS PAR ORIGINE ET MODE DE PREPARATION

Les granulats peuvent être classés en :

- produits naturels, lorsqu'ils n'ont subi aucune opération de transformation autre que mécanique
- produits artificiels dans les autres cas.

Les granulats naturels peuvent être préparés par une succession d'opérations mécaniques : concassage, criblage, lavage, etc.

Le mode de préparation des granulats artificiels doit être précisé dans la désignation du produit (argile expansée, laitier bouleté, laitier expansé...).

NB : Ce document porte essentiellement sur les granulats naturels. Le dernier chapitre de cette monographie sera plus particulièrement consacrée aux granulats artificiels qui entrent à ce titre dans la catégorie des matériaux de substitution.

2.4 - CLASSEMENT PAR NATURE GEOLOGIQUE DE GISEMENT

Les gisements de granulats naturels sont situés soit dans des formations détritiques meubles, soit dans des formations de roches massives.

2.4.1 - Les formations détritiques meubles

Les matériaux issus de roches détritiques meubles présentent l'avantage de ne nécessiter en général qu'un simple lavage pour élimination des fines, un criblage pour tri granulométrique et parfois un concassage des plus gros éléments (cailloux).

En fonction des besoins, les utilisateurs peuvent exiger :

- soit des matériaux roulés
- soit des matériaux concassés
- soit un mélange roulés-concassés.

Pour des usages spéciaux ou pour corriger des courbes granulométriques déficitaires en éléments fins, les sables peuvent subir un broyage complémentaire.

2.4.1.1 - les alluvions des cours d'eau

L'importance des reliefs montagneux sur le territoire français a entraîné le développement d'un réseau hydrographique important. Les phénomènes d'érosion et de transport ont facilité des dépôts considérables dans les lits des rivières, dans les estuaires ou sur le plateau continental marin. Zones à forte consommation de matériaux, les vallées offrent en outre des possibilités économiques de transport par voie d'eau.

Bien que cet avantage tende à s'atténuer sous l'influence conjuguée de la hausse rapide des droits fonciers et des charges inhérentes aux contraintes d'environnement, rappelons que les alluvions constituent actuellement la principale source d'approvisionnement en granulats.

D'âge principalement quaternaire, les alluvions peuvent être prélevées soit directement dans le lit actif (alluvions actuelles du lit mineur), soit dans leur lit fossile (alluvions récentes ou anciennes du lit majeur ou terrasses).

Le plus souvent, les éléments détritiques, émoussés pendant leur transport sur parfois de très longues distances, sont constitués de grains assez fins et arrondis.

A l'intérieur des formations d'origine alluvionnaire, les matériaux sont également classés par les professionnels en 3 catégories qui reflètent le chimisme de la roche :

- grave siliceuse,
- grave silico-calcaire
- grave calcaire

Les graves siliceuses ne contiennent pas (ou peu) d'élément calcaire mais ne sont pas homogènes pour autant : certaines (alluvions de l'Eure ou du Loing) sont constituées d'un mélange de silex (partie grossière) et de sables quartzeux très largement dominant dans les sables alors que la plupart des autres graves résultent de l'usure progressive d'éléments de roches magmatiques ou métamorphiques : galets et graviers de granites, diorites, gneiss, (localement basaltes ou autres laves), etc. et de sables essentiellement quartzeux.

Les graves silico-calcaires regroupent dans cette catégorie des matériaux divers. La partie "siliceuse" est constituée tantôt de débris de roches magmatiques ou métamorphiques (Rhône, Durance, Rhin, par exemple), tantôt de silex (Seine, Yonne). La partie "calcaire" est également très hétérogène, les bassins versants des cours d'eau concernés étant très variés. De façon générale, on constate cependant une évolution très nette de la composition pétrographique de ces graves d'une classe granulaire à l'autre et quel que soit le cours d'eau concerné. Ces ressources sont principalement situées dans le Sud-Ouest (Garonne, Dordogne, Gaves, Adour), le Centre (Loire, Allier), le Bassin de Paris (Loir, Eure, Loing), l'Est (Meurthe et Moselle amont).

Les alluvions calcaires les plus abondantes sont celles du Bassin parisien (Petite Seine, Marne, Aube, Meuse, Somme) ainsi que celles de certains cours d'eau ou parties de cours d'eau du Jura (Doubs, Ain, Tilles). Dans la plupart des cas, il s'agit le plus souvent de matériaux assez peu grossiers, le pourcentage en éléments supérieurs à 50 mm étant généralement faible. Ces graves calcaires sont le plus souvent utilisées par la fabrication des bétons courants ; il arrive cependant qu'elles soient utilisées en technique routière. En effet, certaines graves calcaires présentent de plus fortes résistances mécaniques que certaines graves siliceuses.

2.4.1.2 - Les formations sédimentaires d'origine marine et continentale

D'âge principalement secondaire et tertiaire, les formations sableuses les plus importantes sont les suivantes : sables cénomaniens, sables auversiens, sables de Fontainebleau, sables de Sologne, sables des Landes, faluns miocènes. La plupart de ces sables sont de granularité fine à moyenne à très large dominance quartzeuse.

Si l'on excepte les faluns miocènes riches en coquilles fossiles, l'utilisation de ces sables "moyens" en tant que granulats ne pose pas de difficulté particulière.

Cependant, les sables "fins" posent des problèmes d'utilisation difficiles à résoudre. L'étendue des gisements et les réserves considérables que constituent certains de ces sables (sables des Landes, sables tertiaires du Bassin de Paris) les ont fait utiliser depuis longtemps comme remblais ou couches de forme, mais non comme granulats. Des développements récents montrent que certains d'entre eux peuvent également être utilisés après traitement (surtout au laitier) comme couches de base de chaussées à circulation moyenne (cf. § 8 - Matériaux de substitution).

2.4.1.3 - Les dunes et cordons littoraux

Ils peuvent se présenter en lentilles de sable fin, ou sous forme de plages de galets de mer. Leur possibilité d'exploitation est actuellement fortement limitée par les contraintes d'environnement.

2.4.1.4 - Les arènes

Ce sont les résidus d'altération sur place de roches magmatiques ou métamorphiques, les plus répandues et les plus exploitées étant les arènes d'origine granitique.

De nombreuses roches feldspathiques (granites, diorites, gneiss, migmatites), sont recouvertes d'une épaisseur d'arène qui peut atteindre 15 mètres dans certaines régions (Limousin, Bretagne). Les variations d'épaisseur sont très rapides, liées à la fracturation des roches. Les arènes, qui ont la granularité de sables plus ou moins grossiers passent progressivement à la roche altérée mais cohérente, puis à la roche saine. Les éléments de l'arène sont ceux de la roche mère. La composition minéralogique des arènes reflète donc celle des roches cristallines à partir desquelles elles se sont formées.

Dans la fraction fine des arènes, on trouve fréquemment de l'illite, de la chlorite, des interstratifiés, de la montmorillonite, de la kaolinite. La présence de ces minéraux argileux explique les limites d'utilisation des arènes ; jusqu'à présent elles ont surtout été utilisées en remblais, couches de forme ou couches de fondation de routes à faible circulation. Compte tenu de l'extrême hétérogénéité des gisements, les matériaux d'arène sont très généralement considérés comme sous-produit lors de la réalisation de découvertes de carrières de roches dures.

2.4.1.5 - Les moraines

Ce sont toujours des dépôts très hétérogènes qui ne sont guère exploitables lorsqu'ils ne sont pas repris par un cours d'eau puis redéposés en aval (dépôts fluvio-glaciaires). Dans ce cas, ils peuvent être sommairement assimilés à des dépôts alluvionnaires grossiers. La principale difficulté d'exploitation des moraines provient de leur hétérogénéité granulaire. En effet le même gisement renferme côte à côte des blocs énormes, dont l'exploitation relève souvent de l'explosif et des sables fins limoneux ou argileux parfois difficiles à éliminer.

Les formations périglaciaires alpines peuvent constituer d'immenses réserves en matériaux mais l'accès aux gisements est souvent rendu difficile par les accidents du relief montagnard et l'éloignement des centres de consommation.

2.4.1.6 - Les éboulis de pentes (éluvions, colluvions parfois appelées localement groise, grouine...)

La constitution de la plupart des éboulis correspond aux effets du gel et surtout de l'alternance gel-dégel, lors des différentes périodes glaciaires qui ont affecté nos régions durant le Quaternaire. Il existe donc des éboulis de nature très diverse sur presque tous les versants actuels. Les seuls éboulis exploitables en tant que granulats sont les éboulis calcaires. Les utilisations possibles dépendent des caractéristiques mécaniques des roches dont ils sont issus. Ainsi, les plus intéressants sont les éboulis des calcaires durs de Provence, de certaines régions des Alpes et du Jura, alors que les éboulis de craie sont utilisés comme remblais, et ne peuvent être considérés comme des granulats.

La granularité du matériau est difficilement prévisible pour les éboulis très épais, dans la mesure où ils sont constitués d'apports successifs correspondant à des périodes où l'intensité du gel a pu varier de façon importante et influencer le débit des roches.

L'exploitation des éboulis est limitée par des problèmes de sécurité de carrière ; la stabilité, souvent relative de ces éboulis, étant compromise par les extractions basales.

2.4.2 - Les formations de roches massives

Les gisements de roches compactes fournissent des matériaux pétrographiquement très diversifiés pouvant provenir :

- de formations sédimentaires consolidées (grès, calcaire, dolomie, meulière...). En France, les granulats concassés issus de roches calcaires sont principalement extraits dans le Nord (Viséen et Givétien), en Région Provence Alpe-Côte-d'Azur (Jurassique et Crétacé) et à un degré moindre en Bourgogne (Bathonien, Oxfordien) et en Poitou-Charentes (Bathonien-Bajocien) ;
- de formations métamorphiques en général non schisteuses : quartzite, gneiss, cornéenne, amphibolite, marbre... ;

- de formations éruptives intrusives (granite, diorite, gabbro,...) ou extrusives (basalte, tuf pyroclastique...) non altérées.

Les agrégats d'origine éruptive ou cristallophylienne sont surtout produits dans les zones de socle où ils ne sont pas (ou peu) concurrencés par d'autres ressources (Alpes, Massif Armoricain, Massif Central, Pyrénées, Vendée, Vosges...).

2.5 - CRITERES GEOLOGIQUES D'EXPLOITABILITE

Il convient tout d'abord de préciser que la détermination de l'aptitude d'une roche à être transformée en granulats implique obligatoirement d'effectuer sur la roche concernée un ensemble d'essais normalisés de nature physique et chimique de manière à comparer les résultats de ces tests au cahier des charges qui s'applique à chaque technique d'utilisation (cf. chap. 5 : utilisations et spécifications).

L'identification préalable des matériaux, largement fondée sur des critères géologiques, conduit cependant à une présélection et permet d'autre part d'orienter les essais auxquels ils seront soumis :

- dans le cas des roches massives, l'identification est essentiellement fondée sur les caractéristiques suivantes :
 - . nature pétrographique
 - . structure
- dans le cas de roches meubles, l'identification consiste, essentiellement à déterminer les caractéristiques suivantes :
 - . granularité de la roche (y compris teneur en argile et en général teneur en éléments < 80 µm)
 - . nature pétrographique des différents éléments, et répartition au niveau de chaque classe granulaire.

A ce stade, les principales caractéristiques néfastes dans une optique de production de granulats sont les suivantes :

- au niveau de la pétrographie :
 - . présence d'opale, pyrite, gypse et anhydrite et, éventuellement, dolomie (risque de réaction avec les liants hydrauliques)
 - . abondance de micas, chlorite, séricite (risque de réaction avec les liants hydrocarbonés)
 - . schistosité métamorphique accentuée
 - . altération argileuse (séricite, chlorite, kaolinite...)
 - . microfissuration ou cimentation imparfaite (fragilité et porosité importante - gélivité)
 - . présence de fossiles en grande quantité (coquilles...)

- au niveau de la structure :

- . orientation des grains et plus généralement toute structure anisotrope (risque de production d'éléments plats)
- . structure porphyrique (cristaux > 1 cm) entraînant une certaine fragilité de la roche

- au niveau du gisement :

La faisabilité d'un projet d'exploitation d'un gisement de granulats dépend de nombreux facteurs déjà évoqués :

- . qualité des matériaux bruts (résistance mécanique, propreté...) et aptitude de la roche à subir un traitement et à satisfaire un marché le plus souvent local
- . quantité de matériaux exploitables
- . accessibilité du gisement
- . contraintes d'environnement (faune, flore, paysages, hydrogéologie, pression humaine, découpage foncier, servitudes administratives...)
- . influence de tous ces paramètres sur le coût de production ; rentabilité du projet.

L'un des plus importants paramètres géologiques à prendre en compte pour sélectionner les gisements est le taux moyen de recouvrement, c'est-à-dire le rapport moyen des volumes (ou des épaisseurs) de matériaux stériles de découverte sur les volumes (ou les épaisseurs) de matériaux exploitables.

Schématiquement, les taux habituellement retenus en matière de granulats sont les suivants :

- . pour les gisements de roches meubles $\frac{\text{Découverte}}{\text{Gisement}} \leq \frac{1}{2,5}$ à $\frac{1}{3}$
- . pour les gisements de roches massives $\frac{D}{G} \leq \frac{1}{4}$ à $\frac{1}{5}$

Ces valeurs sont tout à fait indicatives et sont variables en fonction des conditions technico-économiques locales.

Parmi les autres paramètres géologiques importants à prendre en compte à l'échelle du gisement, il convient de citer :

- . des variations granulaires latérales ou verticales des matériaux ou l'existence de niveaux indurés ou argileux, (continus ou discontinus) plus ou moins épais au sein d'un gisement de roche meuble

- . les phénomènes de karstification dans les terrains calcaires au niveau du gisement ou du substratum
- . la présence de failles ou de filons recoupant un massif rocheux
- . les paramètres pouvant influencer sur la tenue des fronts de taille (fracturation, pendage, sismicité, etc.)
- . la présence de lentilles argileuses ou de bancs indurés en gisement meuble (notamment en gisement noyé par une nappe phréatique)

3. Principales techniques appliquées à la recherche et à l'exploitation des granulats

Il existe de nombreux ouvrages techniques spécialisés se rapportant aux diverses méthodes de prospection, d'extraction, de transport, de traitement... des roches à usage de granulats.

Chaque gisement nécessitant généralement l'utilisation d'ensembles de techniques adaptées à la configuration géographique (accès, relief...) ou géologique (nature des roches, présence de nappe phréatique...). Ce mémento se limitera à dresser un résumé des principales méthodes utilisées dans ce vaste domaine industriel.

3.1 - METHODES DE PROSPECTION

Si l'on fait abstraction des contraintes autres que géologiques (en particulier contraintes administratives, foncières et d'environnement) qui peuvent contribuer à restreindre les aires géographiques de recherche de gisement potentiel, le géologue dispose de nombreux outils de prospection qui peuvent être mis en oeuvre en fonction notamment de l'échelle de la reconnaissance (générale ou détaillée) et selon la nature géologique des cibles. On distingue généralement les prospections géologiques de gisement de roche massive *lato sensu* (r. calcaires, et r. éruptives. sl) et les prospections de gisement de roches alluvionnaires avec cependant des méthodes applicables dans les deux cas. Il existe par ailleurs des techniques employées plus exceptionnellement dans le cadre de prospection très particulière (granulats marins par exemple) qui ne seront pas présentées dans ce rapport.

3.1.1 - Gisement de roches massives

3.1.1.1 - Etude géologique

L'examen des cartes et documents géologiques (cartes géologiques, hydrogéologiques, pédologiques, archives du Code minier, banque de données du sous-sol, rapports de la Taxe Parafiscale sur les granulats...) et des photographies aériennes permet généralement de déceler des secteurs favorables à la présence de gisements, ou à défaut d'orienter les travaux ultérieurs de prospection.

L'étude stéréoscopique des photographies aériennes, en particulier, permet de localiser des zones d'affleurement, des excavations de diverses origines, les grands traits structuraux locaux et les principaux axes de fracturation.

Sur le terrain, le travail du géologue est largement facilité par la présence de carrières déjà en exploitation ou des anciens fronts de taille encore accessibles. En effet, leur observation permet de déterminer :

- la nature pétrographique et les caractéristiques générales des différents faciès ;
- l'état de fragmentation des massifs ;
- les différentes causes de pollution, les directions de fracturation, les hétérogénéités, etc.

Pour les zones vierges, l'étude des fronts de taille sera remplacée par un levé géologique du secteur, le prélèvement d'échantillons sur affleurements et, la réalisation d'un sondage, si possible carotté, au moins sur chacun des sites présumés favorables.

L'étude pétrographique sur lames minces et les analyses chimiques qui peuvent être réalisées à partir d'éclats remontés lors de forages destructifs apportent des informations très importantes sur la nature de la roche, son altération, sa dureté...

L'étude géologique de base permet ainsi généralement de définir, dans ses grandes lignes, le contexte tectonique et structural local, ainsi que les faciès (ou la pétrographie) des principales formations favorables. Elle permet également de fixer les méthodes d'investigation du sous-sol les mieux adaptées aux terrains dans le cadre de recherches plus fines.

3.1.1.2 - Méthodes géophysiques de surface

Dans un premier temps les méthodes géophysiques de surface sont utilisées pour affiner les données acquises dans le cadre des études géologiques de base. D'une manière générale, ces méthodes visent à mesurer dans les terrains (en extension latérale ou en profondeur) les variations d'un paramètre physique qui reflète les caractéristiques géologiques du sous sol. Les techniques géophysiques sont faciles à mettre en oeuvre, d'exécution rapide, économiques, non destructives et fournissent par ailleurs des informations sur une large emprise de terrain. cependant ce sont des méthodes indirectes qui doivent être étalonnées et vérifiées par des sondages mécaniques. Ces méthodes sont principalement utiles au niveau des études aux échelles 1/25.000 à 1/10.000.

En reconnaissance de gisement, les paramètres géophysiques discriminant le mieux la nature, l'altération ou la fissuration des terrains sont la résistivité électrique (prospection électrique) et la vitesse de propagation des ondes sismiques dans le sous-sol (sismique réfraction).

Ces deux paramètres sont complémentaires, la résistivité étant sensible surtout aux variations de la quantité d'eau du sous-sol qui dépend elle-même de sa nature, la vitesse de propagation des ondes sismiques variant surtout en fonction de la fissuration.

Les méthodes électriques les plus employées sont les sondages électriques et le traîné de résistivité (à plusieurs longueurs de ligne différentes). La réalisation d'un sondage électrique consiste à établir en un point la courbe de variation, en fonction de la profondeur, de la résistivité apparente des terrains, mesurée en surface à l'aide d'un dispositif à quatre électrodes AMNB. En écartant progressivement les électrodes A et B d'envoi du courant, on intéresse un volume de terrain de plus en plus grand. De ce fait, la profondeur d'investigation augmente avec la longueur de lignes et on parvient à une exploration verticale des différents terrains situés au centre du dispositif de mesure. Le traîné de résistivité consiste, pour sa part, à mesurer, en des points régulièrement espacés, la résistivité apparente du sous-sol selon le dispositif AMNB de dimension constante. Les résultats sont présentés sous forme de carte de résistivité, révélant le contraste entre la découverte, généralement conductrice, et le matériau sain, pratiquement isolant. On obtient ainsi une image de l'épaisseur de la découverte, et la localisation des zones de faille dans la mesure où leur largeur est significative.

La méthode de sismique réfraction (sismique légère) est utilisée de manière systématique pour la reconnaissance des sites de roches magmatiques. Les enregistrements mettent généralement en évidence trois couches : un terrain de surface à faible vitesse sismique (de l'ordre de 300 m/s) qui fait partie de la découverte, un terrain à forte vitesse (entre 2000 et 4000 m/s) qui représente généralement le terrain sain, et, entre les deux, un terrain à vitesse moyenne (de l'ordre de 1000-1500 m/s), difficile à définir, car il peut s'agir, selon le cas, d'un matériau altéré peu fracturé (par exemple, arène compacte) ou d'un matériau sain, très fracturé. Cette indétermination ne peut être levée que par des observations en sondage ou, dans certains cas, par combinaison avec les méthodes électriques.

On établit ainsi des coupes de terrain ou des cartes de zonage géophysique permettant de :

- donner une vue d'ensemble de la structure du gisement et d'en déduire les zones les plus favorables à l'exploitation ;
- orienter le choix de l'emplacement des sondages mécaniques à mettre en oeuvre pour transformer les données géophysiques en coupes et cartes géologiques ;
- en réduire éventuellement le nombre si la réponse géophysique est homogène dans une zone déterminée ;
- extrapoler les résultats de sondages ponctuels, notamment dans les zones inaccessibles aux sondeuses.

3.1.1.3 - Sondages

Les meilleures informations sont apportées par les sondages carottés continus qui permettent la réalisation des coupes géologiques très précises et le prélèvement d'échantillons intacts pour identification pétrographique, étude de la fracturation et essais mécaniques.

En revanche, compte tenu de la lenteur et du coût important des sondages carottés, il est souvent nécessaire de limiter leur nombre au strict minimum et de compléter les investigations en profondeur à l'aide de forages destructifs de type marteau perforateur, plus rapides, et moins coûteux.

Compris entre 50 et 200 mm, le diamètre de sondage destructif le plus souvent utilisé est de 89 mm. Il permet d'une part la remontée d'éclats (cuttings) de dimension satisfaisante et l'utilisation des sondes de diagraphie.

Les marteaux perforateurs utilisés permettent d'atteindre des rendements variant suivant les terrains entre 70 et 150 m par jour (voire plus avec des marteaux-fond-de-trou).

Ces sondages sont suivis par un géologue pour identification des cuttings, lever de coupe, échantillonnage, repérage des niveaux d'eau, mesure de la vitesse d'avancement de l'outil, etc. Les prélèvements d'éclats s'effectuent au minimum tous les 50 cm pour observation, lavage et récupération des cuttings de taille supérieure à 2 mm.

3.1.1.4 - Diagraphie

Surtout utile pour compléter les informations des sondages destructifs, les diagraphies consistent à introduire une sonde dans un trou de forage afin d'enregistrer l'évolution de certaines caractéristiques physicochimiques de la roche avec la profondeur. Les paramètres principalement étudiés sont :

- la radioactivité naturelle (RAN) qui reflète la composition chimique et minéralogique
- la résistivité (Laterolog) qui permet de mettre en évidence les horizons altérés ou fissurés à faible résistivité et les niveaux sains de plus forte résistivité
- la vitesse du son qui permet d'apprécier l'importance de la fissuration du milieu.

3.1.2 - Gisements de roches meubles

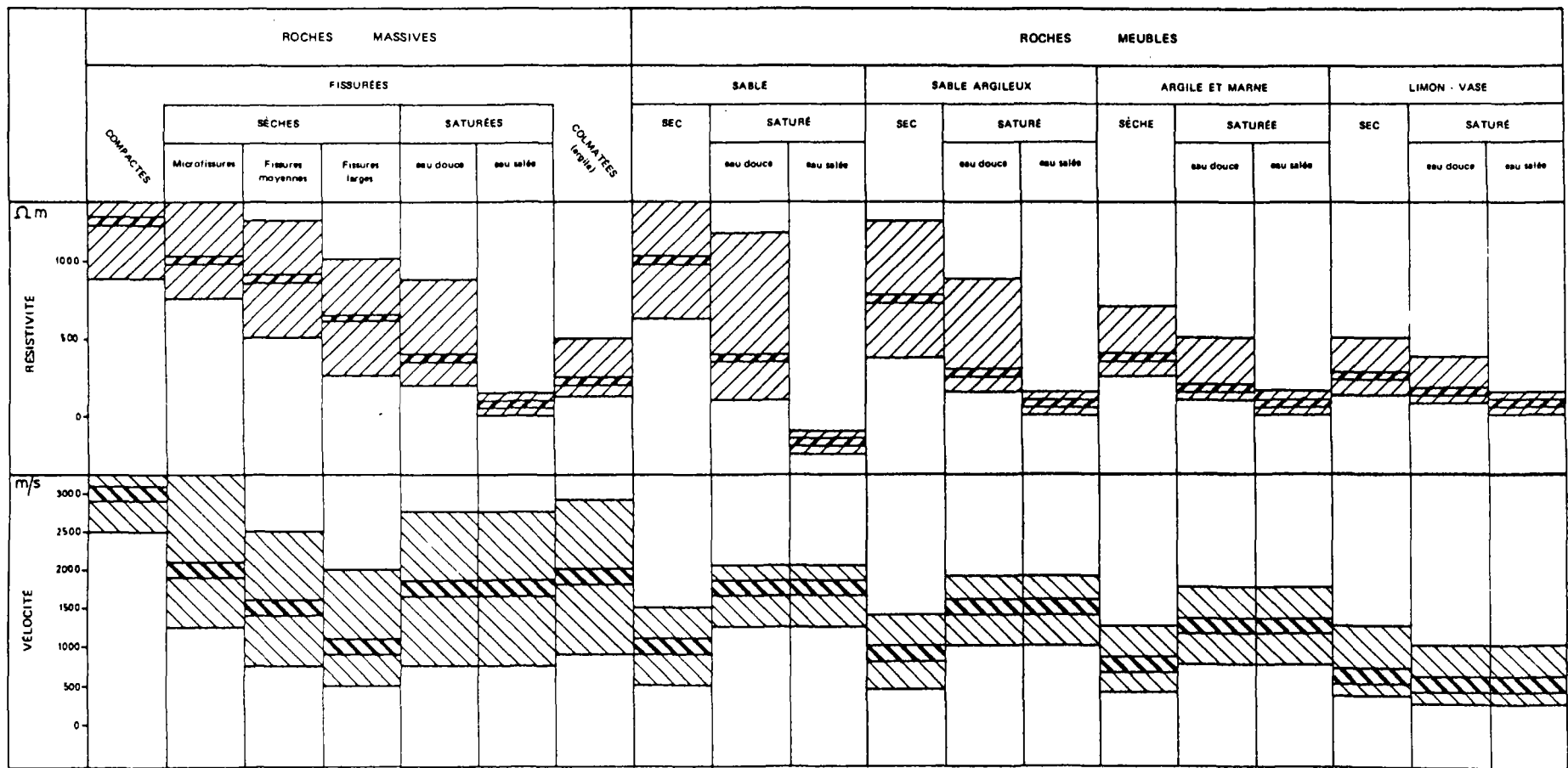
Dans son principe, la recherche d'un gisement de granulats de roche meuble est proche d'une prospection de gisement en roche massive, seules certaines techniques utilisées diffèrent pour répondre à certaines spécificités.

3.1.2.1 - Photo interprétation

Dans le cas des gisements alluvionnaires, l'étude des cartes topographiques et des photos aériennes ou satellitaires permet notamment de préciser les limites des vallées et des terrasses, de visualiser les chenaux récents ou anciens, etc.

**Tableau 9 : Principales caractéristiques physiques des roches
et minerais (source chronique de la recherche minière
1977)**

	Densité g/cm ³	Susceptibilité magnétique 10 ⁻⁶ u.em. c.g.s.	Résistivité ohm.m	Vitesse sismique km/s
Roches sédimentaires				
conglomérat (moraine)			100 - 4.000	1 - 2
grès	1,80 - 2,70	- 0,1 - 3	30 - 4.000	2,1 - 3,5
pélites	2,23 - 2,60	12 - 18	100	2,3 - 4,7
argiles	1,44	2 - 25	1 - 120	1,2 - 2,5
calcaires marneux	1,8	4	120 - 400	1,7 - 4,2
calcaires compacts	2,60 - 2,70	0,1 - 40	5.000 - 50.000	4 - 5
sel gemme	2,10 - 2,40	- 0,8	10 ⁶ - 10 ⁷	4,4 - 6,5
graphite		- 8	10 ⁻³	
Roches métamorphiques				
ardoises	2,70	0 - 100	300 - 1.300	4,25
schistes	2,73 - 3,03	25	100 - 600	3,5 - 4,9
quartzites	2,67 - 2,70	- 0,1 - 10	} > 1.000	6,0 - 6,1
micaschistes	2,70 - 2,96	30 - 5.000		5 - 7,5
gneiss	2,66 - 2,73	30 - 5.000		5 - 7,5
amphibolites, pyroxénites	3,10 - 3,30	100 - 12.000		5,8 - 6,6
Roches plutoniques				
granite à deux micas	2,50	} 10 - 4.000	} 5.000 - 50.000	} 4 - 5,5
granite à biotite	2,70			
diorite, gabbros	2,70 - 3,30	300 - 8.000	1.000 - 20.000	5,5 - 6,8
Roches volcaniques				
rhyolites	2,30 - 2,40	20 - 750	50 - 5.000	
andésites	2,40 - 2,50	100 - 2.000		5,2
basaltes	2,70 - 3,10	100 - 10.000	50 - 5.000	5,4 - 6,4
Minéraux métalliques				
chalcopryrite	4,2	0,4 - 7,6	10 ⁻³ - 10 ⁻²	
galène	7,5	- 0,3	10 ⁻⁵ - 10 ⁻¹	
blende	4,0	- 1	10 ⁻⁴ - 10 ⁻²	
pyrrhotine	4,6	5.10 ⁻⁴ - 5.10 ⁻⁵	10 ⁻⁴ - 10 ⁻²	
hématite	5,1	200 - 3.000	10 ⁻³ - 10 ⁻²	
magnétite	5,2	10 ⁻⁵ - 10 ⁻⁶	10 ⁻⁴ - 10 ⁻²	
pyrite	5,0	100 - 400	10 ⁻³ - 10 ⁻²	
cassitérite	7	- 0,1	10 ⁻⁴ - 10 ⁻¹	
chromite	4,3 - 5,0	600 - 95.000		




 Intervalle de variation maximale pour chaque type de roche



 Valeur caractéristique usuelle du paramètre pour chaque type de roche

Tableau 10 : Relations entre l'état physique des roches et les paramètres résistivité et vitesse sismique

Tableau 11 : Principales techniques de sondages utilisées pour la prospection des gisements de roches meubles

Techniques	Observations
Tarière continue	prélèvement souvent peu représentatif
Tarière simple petit diamètre (type Highway)	profondeur d'investigation en général limitée à 6 m
Tarière simple avec piège à graves	utilisable en site noyé
Vibro-fonçage	permet des prélèvements hors d'eau ou sous eau
Carottier battu	technique rapide (5 à 12 m/h), avec une bonne reconnaissance qualitative du gisement en graves fines
Pelle hydraulique	bonne visualisation de coupes en tranchées sèches
Tarière simple de diamètre > 600 mm	profondeur d'investigation en général limitée à 12 m en sondage hors d'eau
Trepanbenne (type Benoto)	technique lente (6-10 m/j) utilisable en site noyé avec perte partielle des fines
Vibro-fonçage type VPRH	assez bonne rapidité de prélèvement (40-60 m/j). Perte partielle des fines en site sous eau

Tableau 12 : Schéma général des travaux géologiques nécessaires à la reconnaissance d'un gisement de granulats

Stade de l'étude Type de gisement	Etude préliminaire éch. : 1/25.000 à 1/10.000			Etude de détail éch. 1/10.000 à 1/5.000		
	Géophysique	Sondage	Tests	Géophysique	Sondage	Tests
Roche meuble	Traîné de résistivité électrique et sondage électrique Maille 100x200 m à 40x50 m	1 pour 5 ha à 1 pour 2 ha	Granularité ES LA.MDE.FS LA	Traîné de résistivité électrique Maille 20x20 m	1 à 2 sondages par ha	Essais industriels et tests de conformité physico-chimique
Roche massive	Traîné de résistivité électrique en lignes espacées de 100 à 200 m Sondage électrique Maille 50x50 m à 50x100 m	1 sondage carotte par site 1 sondage destructif pour 2 à 5 ha	Etude pétrographique LA.MDE.CA Porosité Résistance au gel	Traîné de résistivité électrique en lignes espacées de 20 à 50 m Sismique réflexion 5 à 10 points par ha	2 sondages carottés par site 1 sondage destructif par ha	Essais industriels et tests de conformité physico-chimique

C.A = coefficient d'aplatissement
 E.S = équivalent de sable
 F.S = friabilité des sables
 L.A = Los Angeles
 M.D.E = Micro deval par voie humide

3.1.2.2 - Géophysique de surface

La technique géophysique la plus utilisée est celle du traîné de résistivité avec des mailles et des longueurs de lignes adaptées au gisement. Cette méthode légère et rapide permet d'obtenir après étalonnage par sondages mécaniques une bonne définition de la découverte du gisement.

La sismique réfraction est plus rarement utilisée, elle peut cependant convenir pour localiser le niveau du substratum lorsque celui-ci est constitué d'un niveau de vitesse sismique bien contrastée par rapport aux graves.

3.1.2.3 - Sondages

Différents types de sondages mécaniques sont utilisés pour la reconnaissance des gisements de roche meuble. Les rapides changements latéraux de faciès, typiques des formations fluviatiles, impliquent une maille de sondage assez serrée (minimum un sondage par hectare) et montrent tout l'intérêt de l'utilisation des méthodes géophysiques.

3.2 - PRIX DES PROSPECTIONS

Le prix d'une étude géologique nécessaire à la recherche d'un gisement de granulats dépend de nombreux facteurs : conditions d'accès, complexité du gisement, techniques utilisées, échelle de précision souhaitée, etc. . En moyenne, l'investissement à prévoir pour la reconnaissance géologique fine d'un gisement est de l'ordre de 5 à 15 centimes par tonne exploitable. Les chiffres les plus élevés s'appliquent aux gisements de roche massive qui doivent impérativement faire appel aux techniques de sondages carottés.

4. Les essais de granulats

Les spécifications relatives aux granulats diffèrent sensiblement suivant les techniques d'emplois et les ouvrages concernés (bétons, couches de chaussées, ballast, etc.). Elles font en règle générale référence à des essais normalisés et fixent les valeurs des seuils techniques autorisés.

Ces spécifications normalisées sont parfois l'héritage d'habitudes et visent à répondre aux conditions de chantier les plus difficiles qui impliquent en principe des marges de sécurité confortables. Cependant, dans certains cas, la conjugaison de conditions plus favorables (faible risque de gel, excellence du drainage, absence de matériaux locaux répondant aux normes...) peut conduire localement à l'utilisation de granulats hors spécifications.

Il existe en France une norme générale applicable aux granulats pour béton (NF P 18301) largement utilisée ainsi que des spécifications particulières fixées par certains utilisateurs tels que l'Équipement, (Fasc 23 et 65 du cahier des prescriptions commune-LCPC), la SNCF (Livret 21-55), l'EDF (Specif. 1974) pour leurs usages propres.

La caractérisation des granulats s'effectue donc grâce à une série de tests normalisés lesquels constituent la référence des moyens d'utiliser pour le contrôle de la qualité des fournitures. La liste complète de ces tests appliqués en France figure dans le tableau 13.

Les exigences qualitatives relatives aux granulats peuvent porter :

- soit sur les caractéristiques intrinsèques des roches du gisement (pétrographie, altérabilité...)
- soit sur les caractéristiques des produits après élaboration par lavage, concassage, criblage etc. (granularité, forme, résistance mécanique, substances polluantes...).

Des documents spécialisés et détaillés décrivent les modes opératoires des nombreux essais de granulats faisant l'objet de normes françaises et étrangères et dont le nombre dépasse la centaine (cf. en particulier le rapport de recherche LPC n° 114-1982). En conséquence, seuls les principaux essais de base (granularité, résistance mécanique) réalisables dès les premières phases de la prospection d'un gisement de granulats et les tests relatifs à la propreté et à la recherche des substances pollutant les granulats seront présentés dans ce chapitre.

Tableau 13 : Récapitulatif des différentes normes françaises des essais de granulats (1982)

Propriétés	Normalisation « Granulats » Afnor	N° de la norme
	Fidélité des méthodes d'essais Prélèvement de matériaux en cours d'écoulement ... Préparation d'un échantillon pour essai	NFP 18-550 NFP 18-552 NFP 18-553 (oct. 78)
Caractéristiques physiques	Mesures des masses volumiques, porosité, coefficient d'absorption et teneur en eau des gravillons et cailloux	NFP 18-554 (déc. 79)
	Mesures des masses volumiques, coefficient d'absorption et teneur en eau des sables	NFP 18-555 (avr. 80)
	Détermination de l'indice de continuité	NFP 18-556 (avr. 80)
Identification pétrographique	Eléments pour l'identification des granulats	NFP 18-557 (déc. 80)
	Détermination de la masse volumique absolue des fines	NFP 18-558
Granularité	Analyse granulométrique par tamisage	NFP 18-560
	Mesure du coefficient d'aplatissement	NFP 18-561 (oct. 78)
Forme et angularité	Détermination de l'épaisseur moyenne des gravillons	NFP 18-562 (févr. 81)
	Détermination du coefficient d'écoulement des gravillons	NFP 18-563 (févr. 81)
	Détermination du coefficient d'écoulement des sables	NFP 18-564 (févr. 81)
	Détermination de l'indice des vides Rigden	NFP 18-565
Homogénéité	Détermination de l'homogénéité des granulats (d supérieur ou égal à 4 mm)	NFP 18-571 (avr. 79)
Résistance à :	Essai d'usure micro-Deval	NFP 18-572 (oct. 78)
— l'usure	Essai Los Angeles	NFP 18-573 (oct. 78)
— la fragmentation	Essai de fragmentation dynamique	NFP 18-574 (avr. 79)
— le polissage	Mesure de coefficient de polissage accéléré des gravillons	NFP 18-575 (déc. 78)
	Mesure du coefficient de friabilité des sables	NFP 18-576 (oct. 78)
	Essai Deval	NFP 18-577 (avr. 79)
	Mesure de la rugosité d'une surface à l'aide du pendule de frottement	NFP 18-578 (déc. 79)
Propreté	Détermination de la teneur en soufre total	NFP 18-582
Présence de	Mesure de la teneur en chlore. Méthode par dissolution	NFP 18-583
matière indésirables	Réactivité potentielle de type alcali-silice des granulats	NFP 18-584
	Essai de stabilité dimensionnelle en milieu alcalin ..	NFP 18-585
Altérabilité	Mise en évidence de matières organiques par colorimétrie	NFP 18-586 (févr. 81)
	Détermination de la propreté superficielle	NFP 18-591 (avr. 79)
	Essai au bleu de méthylène	NFP 18-592 (juil. 80)
	Sensibilité au gel	NFP 18-593 (oct. 78)
	Résistance à la désagrégation. Méthode par cristallisation des sulfates	NFP 18-594
	Valeur de bleu de méthylène : méthode turbimétrique.	NFP 18-595
	Détermination de la propreté des sables : équivalent de sable à 10 % de fines	NFP 18-597 (déc. 79)
	Equivalent de sable	NFP 18-598 (nov. 79)

4.1 - CONTROLE DE GRANULARITE

La granularité d'un granulat définit la distribution dimensionnelle des éléments qui le constituent.

Le contrôle granulaire est réalisé à partir d'un échantillon représentatif d'une masse de matériaux, classés grâce à un ensemble de tamis à mailles carrées de dimension normalisée. Cette technique simple permet d'établir une courbe granulaire qui est l'expression graphique du pourcentage cumulé des tamisats en fonction des différentes classes granulaires.

Cette courbe reflète notamment l'aptitude d'un matériau à la compaction et sa mise en oeuvre vis à vis des spécifications requises afin d'effectuer les corrections nécessaires par un traitement adapté.

Dans le cadre d'une prospection de matériau meuble cet essai est fondamental pour estimer les proportions relatives en sable et graviers d'un gisement et sa teneur en fines.

Chaque spécification est définie par un fuseau qui constitue l'enveloppe des courbes granulaires extrêmes à l'intérieur desquelles doit s'inscrire le granulat fabriqué.

L'objectif est d'obtenir un mélange granulaire ayant une compacité maximale, une faible déformabilité et une résistance mécanique élevée.

De façon générale, un déficit en sable et en fines amène un produit poreux de faible compacité. Inversement, un excès de ces éléments peut provoquer une diminution de résistance ; de plus, la présence excessive de fines rend le matériau plus sensible à l'eau.

4.2 - TEST D'EQUIVALENT DE SABLE (ES)

La présence d'éléments fins dans un granulat réduit les dimensions des vides intergranulaires et par conséquent diminue la perméabilité et augmente l'ascension capillaire et la rétention d'eau. Dans certains cas ces particules fines constituent des éléments de pollution pouvant entraîner une diminution de la résistance des matériaux compacts, des difficultés de mise en oeuvre ou inhiber les réactions de prise des liants hydrauliques.

L'essai d'équivalent de sable (ES) permet de mesurer la propreté d'un sable naturel ou concassé vis à vis des éléments fins.

L'équivalent de sables exprime un rapport volumétrique entre les éléments sableux qui sédimentent et les fines restant en suspension dans un milieu aqueux.

L'essai le plus généralement utilisé est l'équivalent de sable visuel (ESV) qui consiste à agiter dans une éprouvette un échantillon de sable et une solution floculante. Après 20 mn de sédimentation on mesure visuellement la hauteur h_1 de sable décanté au fond de l'éprouvette et la hauteur h_2 correspondant à la somme de h_1 et de l'épaisseur du floculat correspondant aux fines en suspension. La valeur de l'équivalent de sable visuel $ESV = 100 \cdot \frac{h_1}{h_2}$.

En général, un sable peut être considéré comme propre après traitement si son ESV est supérieur à 70.

Il existe d'autres méthodes de mesure de l'Equivalent de sable et en particulier l'Equivalent de sable au piston E.S.P. et l'équivalent de sable 10 % (E.S. 10 %).

4.3 - ESSAI AU BLEU DE METHYLENE (VB)

L'essai d'équivalent de sable est en général complété par le calcul de la valeur au bleu de méthylène (VB) qui mesure la surface que la fraction argileuse "active" du matériau est susceptible de développer. Cette surface, dépendant de la nature et de la proportion des argiles contenue dans un matériau ; cet essai permet une mesure globale qualitative et quantitative de la pollution ou nocivité argileuse.

L'essai consiste à mesurer la capacité d'adsorption en bleu de méthylène c'est-à-dire la quantité de colorant nécessaire pour recouvrir d'une couche monomoléculaire les surfaces externes et internes de toutes les particules argileuses contenues dans 100 g de granulats.

4.4 - ESSAI LOS ANGELES (L.A)

Il a pour but de mesurer sur des gravillons les résistances combinées à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques des éléments.

L'essai consiste à introduire dans un cylindre en rotation pendant une durée déterminée des boulets d'acier et une prise de gravillons appartenant à une classe granulaire de masse normalisée, de mesurer l'importance de la fragmentation et l'usure occasionnée pendant l'essai. La résistance du matériau est d'autant plus grande que la valeur de son coefficient LA sera faible.

4.5 - ESSAI MICRO DEVAL EN PRESENCE D'EAU (MDE)

Il consiste à mesurer la résistance de gravillons à l'attrition, c'est-à-dire la quantité de fines produites lors de la rotation d'un cylindre dans lequel on a placé une masse de graviers, un certain nombre de billes d'acier et une quantité d'eau normalisés.

Dans le domaine routier, les gravillons ont été classés en 5 catégories principales d'utilisation dont la différenciation repose sur les valeurs conjuguées des coefficients LA et MDE (Norme NF P 18.321)

Catégorie	L.A.	M.D.E.
A	≤ 15	≤ 10
B	≤ 20	≤ 15
C	≤ 25	≤ 20
D	≤ 30	≤ 25
E	≤ 40	≤ 35

4.6 - RECHERCHE DES SUBSTANCES POLLUANT LES GRANULATS

La recherche des substances susceptibles d'altérer la qualité d'un granulats et par conséquent la résistance du matériau ou de l'ouvrage auquel il est destiné est important pour choisir les techniques d'éliminations nécessaires voir exclure les zones polluées des secteurs exploitables.

Ces substances indésirables, lorsqu'elles sont présentes en quantité trop importante, peuvent être classées en trois catégories :

- celles qui constituent un écran physique entre les liants et les granulats
- celles qui réagissent avec les liants d'une manière chimique
- les hétérogénéités.

Les principales substances susceptibles de polluer un gisement de granulats et leurs effets sont rappelés dans le tableau 14. Ces substances peuvent être décelées à partir d'études pétrographiques (microscopie), d'analyses chimiques (dosage) ou d'essais physico-chimiques (tests d'absorption d'eau, de gonflement, etc.).

Actuellement l'un des problèmes les plus délicats dans le domaine de la pollution des granulats est la compréhension des phénomènes de réaction alcalis-granulats dont le principe général est le suivant :

Les alcalis du ciment (KOH, NaOH) peuvent réagir avec certains minéraux pour constituer des composés gonflants provoquant à plus ou moins long terme, une fissuration du béton.

Cette réaction observée pour la première fois aux Etats-Unis a eu lieu entre un ciment contenant plus de 0,6 % Na_2O + 0,65 % K_2O et un "calcaire magnésien siliceux".

Depuis, d'autres minéraux ont pu être mis en cause : opale, calcédoine, verres volcaniques, quartz microcristallin, tridymite, cristobalite, dolomite, phyllites et minéraux des serpentines...

Cette liste n'est certainement pas exhaustive, et la prévision de ces phénomènes reste délicate étant donné la lenteur des réactions et le peu de connaissances que l'on a de la stabilité des ions dans des minéraux souvent en cours d'altération.

Tableau 14 : Principales substances polluant les granulats

Substance polluante	Cause de la pollution et effet possible
argiles	écran aux liants en raison de leurs grandes surfaces externes, réduction de la maniabilité des bétons en raison de l'aptitude à l'absorption d'eau. La nécessité d'un surdosage d'eau réduit la résistance des bétons hydrauliques
micas	écran aux liants
coquilles	faible adhérence des liants
chlorures	altération en oxyde, salissure des bétons. Formation d'hydroxyde gonflant en présence d'eau
oxydes de fer	gonflement avec l'eau
matière organique	fixation de la chaux, inhibition de la prise des ciments
minéraux alcali réactifs	gonflement, fissuration des bétons
minéraux altérés ou altérables	formation d'argile, gonflement
fragments de roche poreuse	absorption d'eau ou de bitume, imperméabilisation des matériaux composites
fragments de bois, résidus végétaux, lignite	décolorations locales, écaillage de surface des bétons

4.7 - PRINCIPAUX AUTRES ESSAIS

Parmi les autres essais (non détaillés dans le cadre de ce mémento) les plus couramment utilisés pour caractériser la qualité des granulats, il faut citer :

- les essais liés à la forme des granulats :
 - . indice d'aplatissement (I.A.) qui mesure le pourcentage d'éléments plats dans les graviers par tamisage au travers de grilles à fentes
 - . indice de concassage (I.C.) qui permet de mesurer l'angularité des gravillons et des sables d'origine alluvionnaire. Cet essai consiste à mesurer le pourcentage en poids des éléments provenant du concassage de la fraction $> D$ du matériau d'origine. On tend de plus en plus à lui substituer un essai d'écoulement à l'angulomètre.
- la mesure de la porosité (P)
- l'indice de sensibilité du granulat au gel (G) dont la mesure découle de l'essai Los Angeles
- la mesure de la friabilité des sables (F.S.) qui caractérise la résistance mécanique des sables
- la mesure du coefficient de polissage accéléré (C.P.A.) qui permet d'apprécier la résistance à l'usure des gravillons destinés aux couches routières de roulement. Ce test consiste à faire subir au matériau l'action d'un pneumatique en présence d'abrasif.

Tableau 15 : Caractéristiques moyennes des principaux types de roches
(G. ARQUIE, 1976)

Roche	Résistance à la compression simple (en bars)	M.D.E.	L.A. ou F.D.	C.P.A.	Observations
Calcaire tendre	140	90	60	sans intérêt	matériau inutilisable
Calcaire moyen	400	55	50	0,30	
Calcaire dur	1 900	15	26	0,45	
Quartzite à grains fins ..	3 600	5	15	0,50 à 0,60	matériau excellent (mais posant des problèmes d'adhésivité)
Silex	4 000	3	19	0,40	
Micro granite	1 200 à 2 400	50 à 15	35 à 25	0,50 à 0,60	
Micro diorite	1 600 à 3 000	25 à 10	10 à 7	0,45 à 0,55	matériau excellent (pouvant cependant poser des problèmes de glissance)
Basalte	3 600	5	15	0,45 à 0,50	matériau excellent (mais posant souvent des problèmes de glissance)

M.D.E. : Essai Micro-Deval de la résistance à l'attrition
L.A. ou F.D. : Essai Los Angeles ou essai de fracturation dynamique pour mesurer la fragilité
C.P.A. : Coefficient de polissage accéléré

5. Utilisations et spécifications

5.1 - UTILISATIONS

Les granulats s'emploient principalement dans les bétons, les mortiers, en viabilité pour les différentes couches de chaussée et pour le ballastage des voies ferrées. La nature des matériaux utilisés pour des divers usages varient selon les emplois.

5.1.1 - Emplois dans le béton

Les granulats constituent le squelette des bétons. On emploie de l'ordre de 1,9 t de granulats par m³ de béton. Les bétons contiennent au minimum un mélange de 2 fractions granulométriques :

- des sables 0/d (avec $d < 5$ mm)
- des graviers d/D (avec $d > 2$ mm et $D < 20$ mm).

Les sables sont en général lavés ou défillerisés pour élimination maximale des fines de diamètre inférieur à 80 μ m. Les sables représentent 35 à 55 % de la masse des agrégats contenus dans les bétons.

Actuellement des recherches importantes sont menées dans le cadre d'un programme national pour le développement de techniques d'utilisation de bétons de sable et dans le but de la promotion de ce produit (projet Sablocrete).

5.1.2 - Emplois dans les mortiers

La granularité des sables utilisés dépend de la nature du mortier

granularité	mortier
o/d avec $d < 2,5$ mm	enduits
o/d avec $d < 5$ mm	joints, chappe

Un mètre cube de mortier nécessite de l'ordre de 1.6 t de granulats.

5.1.3.1 - Couches d'assise de chaussées

Les granulats sont employés dans les couches d'assise de chaussée sous forme de :

- graves 0/D (14 mm < D < 60 mm)
"non traitées" ou "traitées" avec des liants divers, hydrauliques ou hydrocarbonés. En moyenne, elles contiennent environ 40 % de sable (0/4 mm)
- sables 0/d (d < 6 mm)
"traités" avec des liants divers, hydrauliques ou hydrocarbonés.

En règle générale, ces granulats, très élaborés, ne sont pas lavés.

5.1.3.2 - Couches de surface de chaussées souples

Les granulats sont employés dans les couches de surface des chaussées souples sous forme de :

- sables 0/d (d < 4 mm)
- graviers d/D (d > 2 mm ; D < 14 ou 20 mm)

Ils sont utilisés simultanément pour la réalisation des "bétons bitumineux" ou "enrobés". La réalisation des "enduits superficiels" (bicouches ou tricouches ne requiert par contre que des graviers).

- les liants utilisés pour chacune de ces applications sont exclusivement hydrocarbonés (bitumes, goudrons, émulsions)
- les "bétons bitumineux" comprennent en général entre 25 et 45 % de sable (0/2 mm).

Ces sables, très élaborés, ne sont pas lavés, ils doivent d'autre part contenir une forte proportion de fillers (environ 18 % de fines < 80 µm).

Les tapis de revêtement autoroutiers en grave bitume sont remplacés en moyenne tous les cinq ans.

5.1.3.3 - Couches de surface de chaussées rigides

Les granulats sont employés dans les dalles en béton de surface des chaussées rigides, sous forme de :

- sables, 0/d (= avec d < 5 mm)
- graviers d/D (avec d > 2 mm ; D < 20 mm)
- cailloux D/D' (avec D' < 40 mm)

Les caractéristiques générales de ces granulats sont similaires aux caractéristiques des granulats pour béton.

Tableau 16 : Principaux matériaux composés faisant appel essentiellement ou exclusivement aux granulats (G. ARQUIE, 1976)

Nature du matériau composé	Pourcentage de granulat (en poids)	Pourcentage des autres constituants en poids	Nature des autres constituants
Grave non traitée	100		
Grave ciment	94 à 97 %	3 à 6 %	ciment
Grave laitier	80 à 90 %	10 à 20 %	laitier granulé
		1 %	chaux
Grave bitume	96 à 97 %	3 à 4 %	bitume
Grave émulsion	96 à 97 %	3 à 4 %	bitume
		disparaît après traitement	eau de l'émulsion
Grave cendre	75 à 85 %	15 à 25 %	cendre volante
		1 à 2 %	chaux
Béton	80 à 85 %	15 à 20 %	ciment
Enduit superficiel	93 à 95 %	5 à 7 %	bitume ou goudron

5.1.3.4 - Emplois en ballastage de voies ferrées

La SNCF distingue d'après des critères de granularité 3 types de granulats pour ses ballastages :

- Ballast normal : 25-50 mm
- Balalst fin : 16-31,5 mm
- Gravillon (gravillon de soufflage) : 10-25 mm

En pratique, il s'agit exclusivement de granulats de roches massives, très élaborés (mais non lavés), utilisés tels quels, sans liant.

5.2 - SPECIFICATIONS

Chaque type d'ouvrage nécessite l'utilisation d'une gamme de matériaux adaptée aux exigences techniques des architectes, des entrepreneurs, de l'Administration... Les seuils des spécifications des granulats sont fournis par 2 normes fondamentales qui figurent en annexe du mémento :

- AFNOR NF P 18.301 : "Granulats, Granulats naturels pour bétons hydrauliques"
- AFNOR NF P 18.321 : "Granulats - Caractéristiques des granulats destinés aux travaux routiers."

5.2.1 - Granulats pour bétons hydrauliques et chaussées routières

Le Ministère des Transports a publié en 1984 un ensemble de directives qui est un texte d'application des normes et visant à fournir pour chaque technique routière les catégories de granulats les mieux adaptés en fonction des 6 classes de trafic de poids lourds.

Classes de trafic	< T3	T3	T2	T1	T0	< T0
Seuils de trafic (PL-MJA*)		50	150	300	750	2000

MJA : moyenne journalière sur l'année

Les différentes spécifications ont été regroupées sur des fiches techniques et concernent :

- Pour les assises de chaussées :
 - . fiche A1. Graves non traitées
 - . fiche A2. Graves traitées aux liants hydrauliques
 - . fiche A3. Graves traitées aux liants hydrocarbonés
- Pour les couches de roulement :
 - . fiche B1. Bétons bitumineux
 - . fiche B2. Enduits superficiels
 - . fiche B3. Bétons bitumineux cloutés

Tableau 17 : Propriétés à retenir en fonction de l'emploi des granulats (G. ARQUIE, 1976)

Emploi	Caractéristiques				
	Granularité	Forme angularité	Propreté	Adhésivité	Résistance mécanique
Bétons ordinaires	Caractéristique importante — Granularité discontinue du type 2/3 gravillon 1/3 sable.	Caractéristique peu importantes.	Qualité fondamentale, tant sous l'angle de la propreté chimique que sous celui de l'équivalent de sable ($ES > 80$).	Pratiquement toujours suffisante.	Exclusion des calcaires tendres.
Bétons de qualité supérieure	Caractéristique très importante. On attribue de plus en plus d'importance à la composition des éléments fins (entre 50 μ et 300 μ). Nombreux essais de détermination de la granularité idéale. Ségrégation à éviter.	Caractéristiques peu importantes. Préférence pour les éléments ronds.	Qualité fondamentale, tant sous l'angle de la propreté chimique que sous celui de l'équivalent de sable, d'autant plus à surveiller que l'on introduit des éléments fins (au-dessous de 100 μ).	Pratiquement toujours suffisante.	Limitation controversée du pourcentage de CO_2Ca notamment dans les sables et notamment pour les bétons routiers (lutte contre la glissance).
Ballast de voie ferrée	Caractéristique très importante. Il y a 2 sortes de matériaux l'un utilisé pour les travaux neufs, l'autre (plus fin) pour le « soufflage » — Granularité serrée dans les 2 cas, car le ballast doit rester non compact.	Caractéristique très importante, voire fondamentale, car la stabilité du ballast n'est assurée que par le frottement interne (entre éléments).	Caractéristique importante, mais facile à assurer.	Sans objet.	Caractéristique fondamentale. Bien que la résistance à la fragilité paraisse la qualité essentielle la SNCF s'appuie essentiellement sur l'essai Deval sec.
Assises routières non traitées	Caractéristique fondamentale. Prescriptions sévères — Courbe idéale légèrement creuse pour augmenter la stabilité.	L'angularité est une caractéristique fondamentale puisque la stabilité n'est assurée que par le frottement interne.	Caractéristique fondamentale $ES \geq 30$ } suivant $ES \geq 35$ } les $ES \geq 40$ } cas	Sans objet.	Caractéristique fondamentale (résistance à l'attrition). Essai de base : micre Deval en présence d'eau (MDE). Mais L.A. aussi cité dans les Spécifications.
Assises routières traitées aux liants hydrauliques	Caractéristique fondamentale. Prescriptions sévères — Courbe conduisant à la compacité maximale.	L'angularité est une caractéristique importante, voire fondamentale pour certains traitements.	Caractéristique fondamentale $ES \geq 30$ } suivant $ES \geq 40$ } les cas Problèmes de pollution chimique.	Caractéristique moyennement importante. Adhésivité suffisante en pratique.	Caractéristique fondamentale (résistance à l'attrition). Bien que l'essai de base doive être le MDE, on utilise aussi le L.A.
Assises routières traitées aux liants hydrocarbonés	Caractéristique fondamentale. Prescriptions sévères — Courbe conduisant à la compacité maximale.	L'angularité est une caractéristique fondamentale.	Caractéristique fondamentale $ES \geq 30$ } suivant $ES \geq 40$ } les cas	Caractéristique importante, mais rarement testée (cf. infra).	Caractéristique fondamentale (résistance à l'attrition). Bien que l'essai de base doive être le MDE on utilise aussi le L.A.
Bétons bitumineux	Caractéristique fondamentale. Prescription très rigoureuses — Courbe très étudiée conduisant à une compacité voisine mais légèrement inférieure à la compacité maximale (une courbe trop pleine pourrait conduire à un « ressuage » du liant, dû à la glissance).	L'angularité est une caractéristique fondamentale tant pour la stabilité que pour la lutte contre la glissance.	Caractéristique fondamentale $ES \geq 40$ ou 45 } suivant les cas	Caractéristique fondamentale, testée par le rapport de la résistance à la compression d'une éprouvette conservée dans l'eau à la résistance d'une éprouvette identique conservée à sec (Essai d'immersion-compression).	Caractéristique doublement fondamentale sous forme de résistance à l'attrition et de résistance au polissage.
Enduits superficiels	Caractéristique fondamentale — Granularité très serrée.	L'angularité et la forme sont toutes les 2 des caractéristiques fondamentales (lutte contre la glissance-risque des gravillons plats de se placer à plat).	La propriété est une caractéristique fondamentale. Les gravillons ne doivent pas comporter de poussières (notamment de concassage). Dépoussiérage ou lavage sont fréquemment employés.	Caractéristique fondamentale mais les insuffisances sont palliées par le « dopage ».	Caractéristique fondamentale C.P.A. $\geq 0,50$.

- Pour les chaussées en béton hydraulique
. fiche C.

En effet, en ce qui concerne la résistance mécanique, les spécifications tiennent compte des sollicitations différentes selon que le granulat est associé ou non à un liant hydraulique ou hydrocarboné.

Dans les assises non traitées la fragmentation et l'attrition des granulats sont fortes, entraînant des modifications de granularité, en particulier au niveau des éléments fins. Ceci a des répercussions importantes sur la stabilité mécanique de l'assise.

Dans les assises traitées les granulats subissent beaucoup moins de sollicitations d'où des exigences moins sévères que dans le cas précédent.

En tout état de cause, les spécifications tiennent compte du type de technique retenue, de la situation de l'assise dans le corps de chaussée, du niveau de trafic et de la nature même des travaux.

Les couches de surface les granulats sont en contact direct avec les pneumatiques, et sont ainsi soumises à des chocs importants provoquant leur fragmentation, particulièrement accentuée par l'utilisation de pneus à crampons. D'autre part, le passage répété de véhicules entraîne une usure des revêtements et le polissage des gravillons ce qui diminue progressivement le coefficient de frottement de la chaussée.

Les spécifications exigeront, notamment pour les enduits, de bons LA, MDE et CPA, ce qui n'est pas toujours compatible. L'expérience montre en effet que les matériaux les plus durs ont généralement un CPA faible, dû à une plus grande homogénéité minéralogique et à la finesse du grain.

Ces différentes fiches figurent intégralement aux pages suivantes ainsi qu'un rappel des catégories de granulats défini par la norme NF P 18.321 (cf. Rabat).

FICHE A.1 - GRAVES NON TRAITÉES

Les spécifications ci-dessous s'appliquent aux graves recomposées et humidifiées (GRH) et aux graves non traitées proprement dites, livrées en une ou plusieurs fractions.

COUCHES DE FONDATION	< T3	T3	T2	T1	TO (et > TO)
caractéristiques normalisées { - dureté des gravillons (LA-MDE) (1) - granularité des gravillons (2) - granularité et propreté des sables (ES 10 % - VB)	CATEGORIES	E (3)	D (3)	C	Etude particulière
		II (3)	II (3)	II	
caractéristique complémentaire (5) { - angularité des gravillons et des sables (Ic - indice de concassage)	CATEGORIES	b (3)	b (3)	b	
		(3) (4)	Ic \geq 30 (3)	Ic \geq 60 (3)	
COUCHES DE BASE	< T3	T3	T2	T1	TO (et > TO)
caractéristiques normalisées { - dureté des gravillons (LA-MDE) (1) - granularité des gravillons (2) - granularité et propreté des sables (ES 10 % - VB)	CATEGORIES	D (3)	C (3)	Etude particulière	
		II (3)	II (3)		
caractéristique complémentaire (5) { - angularité des gravillons et des sables (Ic - indice de concassage)	CATEGORIES	b (3)	b (3)		
		Ic \geq 30 (3)	Ic \geq 60 (3)		

(1) Ne pas prendre en compte le CPA.

(2) Ne pas prendre en compte la forme (A), ni la propreté superficielle des gravillons (P).

(3) En fonction des conditions locales et de l'expérience, d'autres valeurs de spécifications peuvent être prescrites. A ce sujet, on pourra se reporter utilement au Manuel de Conception des chaussées neuves à faible trafic édité par le LCPC et le SETRA en juillet 1981.

(4) Les granulats roulés peuvent être acceptés. Mais dans certains cas, pour faciliter l'exécution des chantiers, il est conseillé d'utiliser des granulats ayant un Ic \geq 30.

(5) Selon le cas, les CCTP peuvent imposer d'autres caractéristiques complémentaires.

Recommandations concernant :

— la sensibilité au gel (G).

Pour les régions soumises au phénomène de gel, on imposera une valeur de sensibilité au gel (G) à ne pas dépasser, notamment dans le cas où existent des problèmes de drainage. On pourra exiger par exemple, pour les couches de base et de fondation, une sensibilité au gel $G \leq 30$ %, la valeur du coefficient LA après gel ne devant pas dépasser la valeur LA spécifiée.

— la friabilité des sables (FS)

Lorsque le sable provient d'une origine différente de celle des gravillons, on prescrira une valeur limite pour la résistance mécanique des sables : $FS \leq 40$. Cependant, dans certains cas, ce seuil pourra être dépassé à condition de justifier d'une expérience suffisante ou de résultats d'études de laboratoire favorables.

FICHE A.2 - GRAVES TRAITÉES AUX LIANTS HYDRAULIQUES

COUCHES DE FONDATION	< T3	T3	T2	T1	TO (et > TO)
caractéristiques normalisées { <ul style="list-style-type: none"> - dureté des gravillons (LA-MDE) (1) - granularité et propreté des gravillons (P) (2) - granularité et propreté des sables (ES 10 % - VB) 	CATEGORIES	E			D
		II			II
		b (3)			b (3)
caractéristique complémentaire (6) { <ul style="list-style-type: none"> - angularité des gravillons et des sables (Ic - indice de concassage) 		≥ 30 % (4)			

COUCHES DE BASE	< T3	T3	T2	T1	TO (et > TO)
caractéristiques normalisées { <ul style="list-style-type: none"> - dureté des gravillons (LA-MDE) (1) - granularité et propreté des gravillons (P) (2) - granularité et propreté des sables (ES 10 % - VB) 	CATEGORIES	E			D
		II			II
		b (3)			b (3)
caractéristique complémentaire (6) { <ul style="list-style-type: none"> - angularité des gravillons et des sables (Ic - indice de concassage) 		• renforcements sous circulation Ic ≥ 30 (4) Ic ≥ 60 Ic = 100 • couches de base de chaussées neuves (ou fondation de chaussées en béton) Ic ≥ 30 (4) Ic ≥ 60 Ic = 100 (5)			

(1) Ne pas prendre en compte le CPA.

(2) Ne pas prendre en compte la forme (A).

Dans le cas où $P > 2$, les gravillons peuvent être acceptés si la valeur de bleu VB est inférieure ou égale à 1,5 (VB obtenue par la méthode turbidimétrique).

(3) La catégorie "c" peut être retenue à condition que les résultats de l'étude des résistances mécaniques obtenues en laboratoire répondent aux spécifications.

(4) Pour les classes de trafic inférieures à T2, on peut admettre une grave entièrement roulée sous réserve d'une stabilité avant prise suffisante.

(5) On peut admettre $60 \leq Ic \leq 100$ si la grave traitée présente une stabilité avant prise satisfaisante, du fait de sa granularité.

(6) Selon le cas, les CCTP peuvent imposer d'autres caractéristiques complémentaires.

Recommandations concernant ;

— la friabilité des sables (FS)

Lorsque le sable provient d'une origine différente de celle des gravillons, on prescrira une valeur limite pour la résistance mécanique des sables : $FS \leq 40$. Cependant, dans certains cas, ce seuil pourra être dépassé à condition de justifier d'une expérience suffisante ou de résultats d'études de laboratoire favorables.

— la présence de matières organiques

Si l'essai normalisé correspondant met en évidence la présence de matières organiques, il convient de vérifier les propriétés mécaniques de la grave traitée pour pouvoir apprécier leur éventuelle nocivité.

FICHE A.3 - GRAVES TRAITÉES AUX LIANTS HYDROCARBONES

Cette fiche concerne les techniques des graves-bitume et des graves-émulsion.

GRAVES BITUMES

Les spécifications relatives à cette technique sont données pour les couches de base et les couches de fondation. Cependant, il convient de noter qu'actuellement la réalisation des couches de fondation en matériaux bitumineux est interdite sur le réseau national (cf circulaire du Ministère des Transports n° 80-29 du 25 février 1980).

COUCHES DE FONDATION		< T3	T3	T2	T1	TO (et > TO)
caractéristiques normalisées	<ul style="list-style-type: none"> - dureté des gravillons (LA-MDE) (1) - granularité et propreté des gravillons (P) (2) - granularité et propreté des sables (ES 10 % - VB) 	CATEGORIES	E			D
			II			II
			a (3)			a
caractéristique complémentaire (7)	<ul style="list-style-type: none"> - angularité des gravillons et des sables (4) (Ic - indice de concassage) 					
		(5)	Ic ≥ 30			Ic ≥ 60

COUCHES DE BASE		< T3	T3	T2	T1	TO (et > TO)	
caractéristiques normalisées	<ul style="list-style-type: none"> - dureté des gravillons (LA-MDE) (1) - granularité et propreté des gravillons (P) (2) - granularité et propreté des sables (ES 10 % - VB) 	CATEGORIES	E	D	D	C	
			II	II	II	II	
			a (3)	a (3)	a	a	
caractéristique complémentaire (5)	<ul style="list-style-type: none"> - angularité des gravillons et des sables (4) (Ic - indice de concassage) 						
		(5)	Ic ≥ 30	Ic ≥ 60	Ic = 100	Ic = 100 (6)	

(1) Ne pas prendre en compte le CPA.

(2) Ne pas prendre en compte la forme (A).

Dans le cas où $P > 2$, sans toutefois dépasser 3, les gravillons peuvent être acceptés si la valeur de bleu VB est inférieure ou égale à 1 (VB obtenue par la méthode turbidimétrique).

(3) Dans certains cas, la catégorie "b" peut être retenue à condition que les résultats de l'étude de formulation réalisée en laboratoire répondent aux spécifications.

(4) Pour améliorer la maniabilité et la compacité des graves, on pourra être amené à ajouter du sable roulé (au maximum 10 %).

(5) Les granulats roulés peuvent être acceptés, mais pour faciliter l'exécution des chantiers, il est conseillé d'utiliser des granulats ayant un $Ic \geq 30$.

(6) $Rc \geq 2$ lorsque le trafic est canalisé ou lorsque le tracé comporte de fortes rampes ou lorsque le support est rigide.

(7) Selon le cas, les CCTP peuvent imposer d'autres caractéristiques complémentaires.

Recommandations concernant la friabilité des sables (FS)

Lorsque le sable provient d'une origine différente de celle des gravillons, on prescrira une valeur limite pour la résistance mécanique des sables : $FS \leq 40$. Cependant, dans certains cas, ce seuil pourra être dépassé à condition de justifier d'une expérience suffisante ou de résultats d'études de laboratoire favorables.

GRAVES EMULSION

L'utilisation de graves émulsion en couche de base pour un trafic supérieur à T3, fera l'objet d'une étude particulière de laboratoire, notamment pour préciser la qualité des granulats.

COUCHES DE BASE		< T3	T3	T2	T1	TO (et > TO)
caractéristiques normalisées { <ul style="list-style-type: none"> - dureté des gravillons (LA-MDE) (1) - granularité et propreté des gravillons (P) (2) - granularité et propreté des sables (ES 10 % - VB) 	CATEGORIES	E	D	Etude particulière		
		a (3)	a (3)			
caractéristique complémentaire (4) { <ul style="list-style-type: none"> - angularité des gravillons et des sables (Ic - indice de concassage) 		Ic ≥ 30	Ic ≥ 60			

(1) Ne pas prendre en compte le CPA.

(2) Ne pas prendre en compte la forme (A).

Dans le cas où $P > 2$, sans toutefois dépasser 3, les gravillons peuvent être acceptés si la valeur de bleu VB est inférieure ou égale à 1 (VB obtenue par la méthode turbidimétrique).

(3) Dans certains cas particuliers, la catégorie "b" peut être retenue, à condition que les résultats de l'étude de formulation réalisée en laboratoire répondent aux spécifications.

(4) Selon le cas, les CCTP peuvent imposer d'autres caractéristiques complémentaires.

Friabilité des sables : cf. remarque donnée pour les graves bitume.

FICHE B.1 - BÉTONS BITUMINEUX

COUCHES DE LIAISON		< T3	T3	T2	T1	TO	> TO															
caractéristiques normalisées	<ul style="list-style-type: none"> - dureté des gravillons (LA-MDE) (1) - granularité, forme, propreté des gravillons (A-P) - granularité, propreté des sables (ES 10 % - VB) 	CATÉGORIES	D			C																
		II				II																
		a				a																
caractéristique complémentaire (4)	<ul style="list-style-type: none"> - angularité des gravillons et des sables (2) (Ic - indice de concassage ou Rc - Rapport de concassage) 	Ic ≥ 30	Ic = 100			Rc ≥ 2																
COUCHES DE ROULEMENT		< T3	T3	T2	T1	TO	> TO															
caractéristiques normalisées	<ul style="list-style-type: none"> - dureté des gravillons (LA - MDE - CPA) - granularité, forme, propreté des gravillons (A-P) - granularité, propreté des sables (ES 10 % - VB) 	CATÉGORIES	C			B	B (3)															
		II				II	II															
		a				a	a															
caractéristiques complémentaires (4)	<ul style="list-style-type: none"> - angularité des gravillons et des sables (2) (Ic - Indice de concassage ou Rc - Rapport de concassage) - position du fuseau de régularité aux tamis intermédiaires pour les gravillons 	Ic ≥ 60		Rc ≥ 2			Rc ≥ 4															
		<table border="1"> <thead> <tr> <th>classe granulaire</th> <th>le passant à</th> <th>doit être compris entre</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4-6,3</td> <td>5 mm</td> <td>30 et 55 %</td> </tr> <tr> <td>6,3-10</td> <td>8 mm</td> <td>37 et 62 %</td> </tr> <tr> <td>6,3-14</td> <td>10 mm</td> <td>45 et 70 %</td> </tr> <tr> <td>10-14</td> <td>12,5 mm</td> <td>52 et 77 %</td> </tr> </tbody> </table>		classe granulaire	le passant à	doit être compris entre	4-6,3	5 mm	30 et 55 %	6,3-10	8 mm	37 et 62 %	6,3-14	10 mm	45 et 70 %	10-14	12,5 mm	52 et 77 %				
		classe granulaire	le passant à	doit être compris entre																		
4-6,3	5 mm	30 et 55 %																				
6,3-10	8 mm	37 et 62 %																				
6,3-14	10 mm	45 et 70 %																				
10-14	12,5 mm	52 et 77 %																				

(1) Ne pas prendre en compte le CPA.

(2) Dans certains cas, pour améliorer la maniabilité et la compacité des BB, on pourra être amené à ajouter du sable roulé (au maximum 10 %).

(3) Le principe de compensation des valeurs du coefficient CPA par les valeurs des coefficients LA + MDE, ou de ces dernières par les valeurs du coefficient CPA, s'applique conformément aux dispositions de la norme NF P 18-321, sauf avis contraire du laboratoire des Ponts et Chaussées.

(4) Selon le cas, les CCTP peuvent imposer d'autres caractéristiques complémentaires.

Recommandations concernant :

— l'origine des sables (formules mixtes)

La règle normale doit être de constituer l'ensemble du squelette minéral à partir de granulats de même origine. Cependant, il pourra s'avérer nécessaire de faire appel, pour la fourniture des sables de concassage, à une carrière différente de celle fournissant les gravillons. Dans ce cas, le sable d'apport devra avoir des caractéristiques mécaniques suffisantes :

- FS ≤ 30 si la catégorie spécifiée des gravillons est B,
- FS ≤ 40 si les catégories spécifiées des gravillons sont C ou D.

L'utilisation de sables de nature calcaire sera limitée aux classes granulaires inférieures à :

- 4 mm pour les trafics T1, TO et > TO,
- 6,3 mm pour les autres trafics,

de plus, on exigera un CPA ≥ 0,50 (compensation non admise) pour la "fraction gravillons" supérieure à 4 mm ou à 6,3 mm, cette fraction représentant au moins 45 % du mélange.

— les fines d'apport et les fines de sable

Les CCTP peuvent imposer des spécifications concernant les caractéristiques des fines (cf directive SETRA-LCPC pour la réalisation des couches de surface de chaussées en béton bitumineux).

FICHE B.2 - ENDUITS SUPERFICIELS

		< T3	T3	T2	T1	T0	> T0
caractéristiques normalisées	}	- dureté des gravillons (LA - MDE - CPA) - granularité, forme, propreté des gravillons (A-P)					
		C	B	B	B	A	A
caractéristiques complémentaires (1)	}	- angularité des gravillons (Ic - Indice de concassage ou Rc - Rapport de concassage) - position du fuseau de régularité aux tamis intermédiaires					
		Ic = 100	Rc ≥ 2	Rc ≥ 4	Rc ≥ 4	Rc ≥ 6	Rc ≥ 6
		classe granulaire	le passant à	doit être compris entre			
		4-6,3 6,3-10 10-14	5 mm 8 mm 12,5 mm	30 et 55 % 37 et 62 % 52 et 77 %			

(1) Selon le cas, les CCTP peuvent imposer d'autres caractéristiques complémentaires.

FICHE B.3 - BÉTONS BITUMINEUX CLOUTÉS

BB SUPPORT		< T3	T3	T2	T1	TO	> TO
caractéristiques normalisées	- dureté des gravillons (LA-MDE) (1) - granularité, forme, propreté des gravillons (A-P) - granularité, propreté des sables (ES 10 % - VB)	CATEGORIES	C			B	
			II			II	
			a			a	
caractéristique complémentaire (5)	- angularité des gravillons et des sables (2) (Ic - Indice de concassage ou Rc - Rapport de concassage)	Ic ≥ 60	Rc ≥ 2		Rc ≥ 4		
CLOUTAGE		< T3	T3	T2	T1	TO	> TO
caractéristiques normalisées	- dureté des gravillons (LA - MDE - CPA) - granularité, forme, propreté des gravillons (A-P)	CATEGORIES (3) (4)	B (3) (4)		B (3) (4)	A (3)	
			II	I bis	I	I	
caractéristique complémentaire (5)	- angularité des gravillons (Rc - Rapport de concassage)		Rc ≥ 2	Rc ≥ 4		Rc ≥ 6	

- (1) Le CPA n'est pas pris en compte.
 (2) Dans certains cas, pour améliorer la maniabilité et la compacité des BB, on pourra être amené à ajouter du sable roulé (au maximum 10 %).
 (3) La règle de compensation entre les valeurs LA - MDE - CPA ne s'applique pas.
 (4) Pour les routes en sites difficiles, il est conseillé de majorer de 0,05 les valeurs de CPA spécifiées.
 (5) Selon le cas, les CCTP peuvent imposer d'autres caractéristiques complémentaires.

Recommandations concernant d'autres caractéristiques pour les granulats destinés au BB support de cloutage :

- Résistance mécanique des sables } voir fiche B1.
 — Caractéristiques des fines }

RAPPEL DES CATÉGORIES DE LA NORME NF P 18-321 DONT LE TEXTE INTÉGRAL EST REPRODUIT EN ANNEXE

CARACTÉRISTIQUES INTRINSÈQUES DES GRAVILLONS	CATÉGORIE (1)	LA	MDE	CPA (2)
	A	≤ 15	≤ 10	≥ 0,55
	B	≤ 20	≤ 15	≥ 0,50
	C	≤ 25	≤ 20	≥ 0,50
	D	≤ 30	≤ 25	—
	E	≤ 40	≤ 35	—

- (1) Compensation des valeurs : cf. annexe 1.
 (2) Pour les couches de roulement.

CARACTÉRISTIQUES DE FABRICATION DES GRAVILLONS	CATÉGORIE (1)	GRANULARITÉ	A (2) ou Em		P
	I	Refus à 1,25 D : 1 à 15 % (20 % si D ≤ 1,58d)	≤ 10	$\frac{D+d}{3}$	≤ 0,5
	I bis	0 % L'étendue maximale du fuseau de régularité doit être de :	≤ 15	$\frac{D+d}{3}$	≤ 1
	II	Refus à 1,58 D : - 10 % à d et D - 25 % à $\frac{D+d}{2}$	≤ 20	3,5	≤ 2
	III	0 % Si D ≥ 2,5 d, le tamisat à $\frac{D+d}{2}$ doit être compris entre 33 et 66 %	≤ 30		≤ 3

- (1) Pour certains usages (couches de fondation et de base), les spécifications des caractéristiques de fabrication peuvent être limitées à celle de la granularité.
 (2) Pour les granularités inférieures à 10 mm, A est majoré de 5 unités.

CARACTÉRISTIQUES DE FABRICATION DES SABLES OU DES GRAVES	CATÉGORIE	GRANULARITÉ	ES 10 %	VB (1)
	a	Refus à 1,58 D : 0 % Refus à D : 1 à 15 % L'étendue maximale du fuseau de régularité doit être de :	≥ 60	≤ 1
	b	- 10 % à D et au tamis de 0,5 mm - 15 % aux tamis intermédiaires (2 ; 4 ; 6,3 ; 8 ; 10 ; 14 ; 20 mm)	≥ 50	≤ 1,5
	c	- 4 % à 0,08 mm si la teneur en fines < 12 % - 6 % à 0,08 mm si la teneur en fines ≥ 12 %	≥ 40	≤ 2

- (1) VB : valeurs de bleu à respecter si la valeur d'ES 10 % est inférieure à la valeur spécifiée.

CARACTÉRISTIQUES COMPLÉMENTAIRES

Outre l'angularité qui est prise en compte quelles que soient la technique et la classe de trafic, les CCTP peuvent imposer des spécifications portant sur d'autres caractéristiques complémentaires, notamment :

- La granularité
- La sensibilité au gel
- L'homogénéité
- La friabilité des sables
- L'absence de matières organiques
- l'altérabilité
- etc.

Consulter les laboratoires des Ponts et Chaussées pour fixer des valeurs de spécifications, selon le cas considéré

FICHE C - CHAUSSÉES EN BÉTON HYDRAULIQUE

Les spécifications relatives aux caractéristiques normalisées ont été établies à partir de la norme NF P 18-301 ("Granulats - Granulats naturels pour bétons hydrauliques") dont le texte intégral est reproduit en annexe

Pour les bétons maigres utilisés en couche de fondation, on limitera les spécifications — quel que soit le trafic — aux caractéristiques de granularité, de dureté des gravillons ($LA \leq 40$ et $MDE \leq 35$) et de propreté des sables ($ESV \geq 65$).

CARACTÉRISTIQUES NORMALISÉES

— GRANULARITÉ

*sables

. Tamisat à 0,08 mm

. Tolérance sur le module de finesse (en valeur absolue) (1)

*gravillons et cailloux

. si $D \geq 2,5 d$

— PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET PHYSICO-CHIMIQUES

. Dureté des gravillons (LA-MDE)

. Friabilité des sables (FS)

. Forme des gravillons (A)

. Homogénéité des gravillons (H)

. Sensibilité au gel des gravillons (G)

. Propreté des sables (ESV)

. Propreté des gravillons (P)

. Absorption d'eau par les sables ou les gravillons (Ab)

$< T3$	T3	T2	T1	TO	$> TO$
Granularité conforme à la norme NF P18-304					
$< 10 \%$					
$\pm 0,3$					
$33 \% < \text{tamisat à } \frac{D + d}{2} < 66 \%$					
$LA \leq 40$ $MDE \leq 35$			$LA \leq 25$ $MDE \leq 20$		
$FS \leq 40$		$FS \leq 20$ (2)			
$A \leq 30 \%$					
$H \geq 97 \%$ (avec $\alpha = 0,4$)					
$G \leq 50 \%$					
$ESV \geq 75$ ou ≥ 65 lorsqu'il s'agit d'un sable de broyage ou de concassage (3)					
$P \leq 2 \%$ (4)					
$Ab < 2 \%$					

En outre, les granulats devront répondre aux spécifications de la norme en ce qui concerne : la nature de la roche et la présence éventuelle d'impuretés prohibées, la continuité de la courbe granulométrique, la teneur en soufre total, la teneur en chlorures, l'absence de matières organiques, la teneur en éléments coquilliers.

(1) Le module de finesse d'un granulat est égal au 1/100 de la somme des refus exprimés en pourcentages sur les différents tamis de la série suivante : 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5 - 10 - 20 - 40 et 80 (norme NFP 18-304).

(2) $FS \leq 40$ si la chaussée en béton hydraulique est revêtue par un enduit superficiel.

(3) Les sables dont l'ESV (équivalent de sable visuel - Norme NF P18-598) est inférieur à ces valeurs sont cependant conformes si la valeur de bleu (VB) est inférieure ou égale à 1 g pour 100 g de fines (VB obtenue par la méthode turbidimétrique Norme P 18-595).

(4) $\leq 5 \%$ pour un gravillon concassé, si la valeur de bleu (VB) est inférieure ou égale à 1 g pour 100 g de fines (VB obtenue par la méthode turbidimétrique - Norme P 18-595).

CARACTÉRISTIQUES COMPLÉMENTAIRES

Selon le cas, les CCTP peuvent imposer des caractéristiques complémentaires.

En particulier, lorsque les chaussées en béton hydraulique ne sont pas revêtues par une couche de roulement (par exemple un enduit superficiel) ou par un cloutage, il convient d'ajouter des spécifications concernant la résistance au polissage des gravillons :

	< T3	T3	T2	T1	TO	> TO
Résistance au polissage des gravillons pour les chaussées en béton hydraulique non revêtues par une couche de roulement ou un cloutage (CPA).	—	CPA \geq 0,45			CPA \geq 0,50	

5.2.2 - Granulats pour ouvrages SNCF

5.2.2.1 - Ballast

Il n'existe pas en France de spécification normalisée dans ce domaine. Les spécifications de référence, émises par la Direction de l'Équipement de la SNCF sont contenues dans le document suivant : "Spécification Technique pour la fourniture de Ballast et, Gravillon" - N° 695-D- de Décembre 1980. Par ailleurs, le domaine d'utilisation de chaque nature de ballast est déterminé dans la Notice Générale EF2C32 n° 2. Le ballast et le gravillon proviennent exclusivement du concassage de roches extraites dans des carrières de pierres dures. Pour la fourniture de ballast, l'exploitant est tenu de faire agréer sa carrière selon un protocole défini par la SNCF.

Les spécifications de la SNCF pour les ballasts reposent principalement sur des critères de granularité, résistance, forme, homogénéité et propreté.

La résistance d'un échantillon de granulats pour ballast est caractérisée par un coefficient de dureté DRI déterminé par le biais d'abaques à partir des résultats d'essais Deval et Los Angeles (eux-mêmes effectués selon des modes opératoires imposés par la SNCF) (cf. fig. 9).

Pour chaque carrière, une étude statistique des coefficients DRI permet de calculer le coefficient Dureté Globale DRG.

Pour être agréé, la carrière ne présente qu'un coefficient de DRG supérieur ou égal à 13,5. Ce coefficient spécifié dans chaque marché varie de 13 à 16 suivant l'utilisation prévue.

Dans le cadre du contrôle de la granularité, les fuseaux sont établis en application des prescriptions du Bulletin Officiel du Ministère de l'Équipement et du Logement Fasc. 23 (cf. tableau 18).

Tableau 18

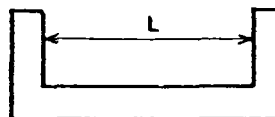
Points singuliers des fuseaux	Dimensions des mailles carrées			Tolérances normales
	ballast normal	ballast fin	gravillon	
D max = 1,25 D	63	40	31,5	Masse «retenue» 0 %
D	50	31,5	25	Masse «retenue» < 10 %
Tamis intermédiaire	40	25	16	Masse «retenue» comprise entre 26 et 60 % pour le ballast et entre 40 et 75 % pour le gravillon
d	25	16	10	Masse «retenue» > 90 %
d min. = 0,63 d	16	10	6,3	Masse «retenue» ≥ 98 %

Les éléments de ballast et de gravillon doivent présenter des formes polyédriques à arêtes vives.

Leur longueur et leur épaisseur sont contrôlées par le test des "aiguilles" et le test des "plats".

Les valeurs de la cote L du gabarit de contrôle du test des "aiguilles" doivent être celles qui sont indiquées dans le tableau ci-après :

Tableau 19



Matériau	D	D max.	L	Tolérances normales
Ballast normal	50	63	92	Le % en masse de matériaux de longueur $> L$ ne doit pas dépasser 4 %
Ballast fin	31,5	40	58	
Gravillon	25	31,5	46	

La largeur des fentes des grilles de contrôle du test des "plats" doit correspondre aux valeurs de la cote "e" indiquées dans le tableau ci-dessous :

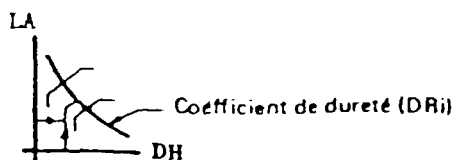
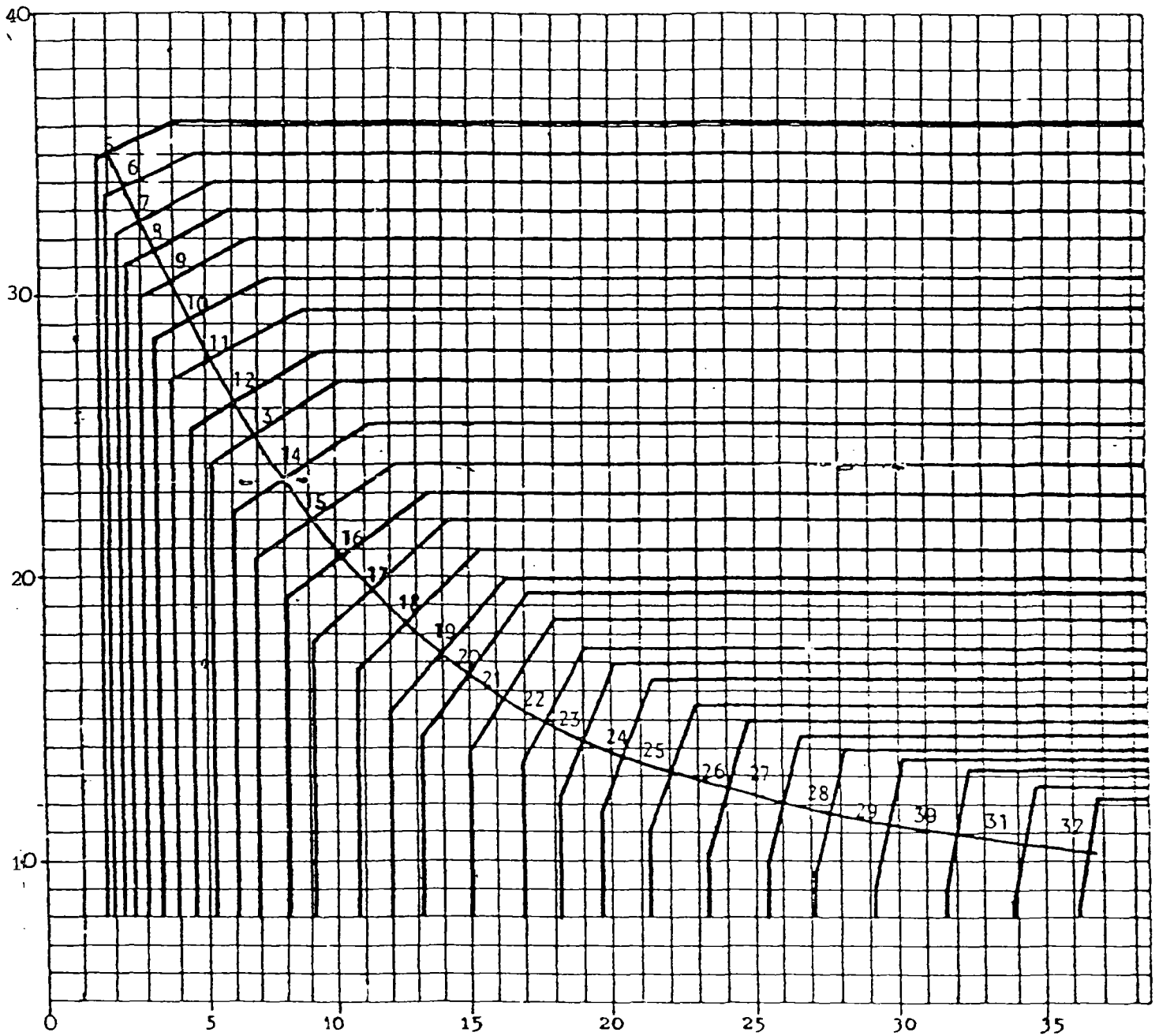
Tableau 20

Matériau	d	d min.	e	Tolérances normales
Ballast normal	25	16	16	Le % en masse de matériaux passant à travers les grilles dont les fentes ont pour largeur «e» ne doit pas dépasser 7 %.
Ballast fin	16	10	10	
Gravillon	10	6,3	6,3	

Au niveau de l'homogénéité du granulat, la proportion d'éléments friables ne doit pas excéder 3 %. Sur le plan de la propreté, les matériaux ne doivent pas comporter globalement plus de 1 % de sable, poussières, débris terreux, etc.

5.2.2.2 - Remblais techniques

Les structures d'assises, les couches drainantes et les ouvrages de protection des voies SNCF font l'objet de spécifications qui figurent dans un cahier des charges propre à cette société. Le tableau n° 21 synthétise les principales caractéristiques des matériaux exigées pour les ouvrages TGV.



LA : Coefficient «LOS ANGELES»
 DH : Coefficient «DEVAL HUMIDE»

Figure 9 : Ballast SNCF : Détermination du coefficient de dureté en fonction des coefficients "Los Angeles" et "Deval Humide"

**Tableau 21 : PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX
autres que le remblai courant et le ballast
utilisé par la SNCF pour ses ouvrages TGV**

Destination	Type	D (mm)	% \leq 80 μ m	ESV	VB si ESV non respecté	LA	MDE
Matériaux Drainants	- Zone inondable (ZI)	80 à 500	\leq 5	> 35			
	- Zone humide (ZH)	80 à 500	\leq 10	> 35			
Blocs Techniques	- Grave traitée	60	\leq 10	> 30		\leq 25	\leq 20
	- Grave non traitée	31,5 en centrale 60 en place	\leq 10	> 30		\leq 25	\leq 20
Ouvrages de Protection	- Masques, tranchées et éperons drainants	60 à 400		> 40			
Structure d'assise	- Couche de forme	150	\leq 10	> 30	< 2	\leq 25	\leq 20
	- Sous couche	31,5 (fuseau complet)	3 à 7	> 40	< 1,5	\leq 20	\leq 15

6. Méthodes d'exploitation et de traitement

6.1 - TECHNIQUES

Compte tenu de la diversité de nature des roches susceptibles de fournir des granulats, les moyens nécessaires à l'exploitation des gisements sont extrêmement variables.

L'exposé de toutes les techniques utilisables en chantier mériterait de longs développements et il convient pour plus de détails de se référer aux documents spécialisés dont les plus connus sont par ailleurs cités dans la liste de références bibliographiques annexées à ce mémento.

Les principaux moyens d'extraction sont indiqués pour mémoire dans le tableau 22.

La préparation des granulats consiste généralement en une succession d'opérations mécaniques simples destinées à trier les matériaux par classes granulaires avec ou sans concassage préalable et à procéder éventuellement à une épuration de façon à éliminer les éléments fins indésirables.

Tableau 22 : Principaux matériels employés pour l'exploitation des carrières

Phase	Matériel	Type usuel d'exploitation
Foration	marteau perforateur fond de trou ou hors du trou	RM
Extraction	pelle mécanique	RM-Rm
	dragueline	Rm
	pelle hydraulique	RM-Rm
	bouteur sur chenilles	RM
	chargeur sur pneumatiques	RM-Rm
	décapeuse automotrice	Rm
	drague à godets	Rm
	drague à grappin	Rm
	drague suceuse	Rm
	excavation à godets	Rm
roue-pelle	Rm	
Transport	tombereau	RM-Rm
	camion	RM-Rm
	bandes transporteuses	RM-Rm
	conduite hydraulique	Rm

RM = Roche massive

Rm = Roche meuble

Le matériel de traitement est variable selon :

- la nature pétrographique de la roche brute (dimension des blocs, pollution argileuse, dureté, abrasivité...)
- les exigences qualitatives sur les produits finis (granularité, propreté, angularité...)
- la capacité de production souhaitée.

Les installations de traitement sont généralement classées en deux catégories selon que celui-ci s'effectue à sec ou qu'il comporte un circuit de lavage (voie humide).

Par voie sèche le schéma de l'installation comprend en général des unités de criblage et de concassage, éventuellement de défillerisation.

Par voie humide, le schéma comprend le lavage, le criblage et le concassage.

En tête de traitement des roches massives (avant ou après concassage primaire) l'installation comprend parfois une unité de scalpage destinée à éliminer par criblage les matériaux terreux, les blocs d'argiles, les morceaux de bois...

Lorsque le matériau est très argileux, l'installation peut également disposer d'un circuit de débouage.

Dans certains cas liés par exemple à des facteurs économiques (marché de sable fin) ou techniques (correction de courbes granulométriques), les installations peuvent également comporter en fin de chaîne des unités de broyage de sable.

Enfin, l'exploitant procède souvent à des recompositions de divers matériaux pour obtenir, par mélange en proportions voulues des diverses classes granulométriques fabriquées, un produit conforme aux spécifications de l'utilisateur.

Les granulométries les plus couramment produites en gravières ou en carrières sont les suivantes (en mm) :

- sables : 0/2, 0/3, 0/4, 0/5, 0/6
- graviers : 3/8, 4/10, 5/15, 6/20, 10/20, 15/25, 20/40, 30/60, 40/50...
- mixtes : 0/10, 0/31,5, 0/60...

6.2 - COUT D'EXPLOITATION

Les coûts d'exploitation sont naturellement très variables d'une carrière à l'autre. En général, il est admis que les coûts de production se répartissent schématiquement de la façon suivante :

- Gisement alluvionnaire :
 - . découverte, extraction, chargement, transport : 1/2
 - . traitement, stockage : 1/2

- Gisement de roche massive :
 - . découverte, abattage : 1/3
 - . chargement, transport : 1/3
 - . traitement, stockage : 1/3

En moyenne le matériel roulant (chargeuses, tombereaux) doit être remplacé tous les 5 ans. Les installations fixes de traitement ont une durée de vie comprise en général entre 10 et 20 ans. La qualité du matériel, les conditions de fonctionnement ou d'entretien des engins et l'abrasivité des roches exploitées influent notablement sur la vitesse d'usure du matériel.

L'énergie nécessaire à la production des granulats (gazole, explosif, électricité...) représente de l'ordre de 8 à 15 % du prix de vente moyen des matériaux.

7. Matériaux de substitution

7.1 - DEFINITIONS

Dans l'esprit des personnes familiarisées avec les problèmes de la production de granulats, la notion de matériau de substitution peut recouvrir deux sens bien différents qu'il convient de préciser :

- a) le terme de substitution peut s'appliquer à des matériaux traditionnels entre eux. En effet lorsque une production locale de sables et graviers doit être réduite pour cause d'épuisement de gisement ou de diverses contraintes, les exploitants de granulats doivent se reporter sur d'autres matériaux de type roches dures concassées ou granulats marins qui sont alors qualifiés de matériaux de substitution. Ce terme s'applique également lorsque les sables et graviers dragués en lit mineur sont remplacés par des matériaux exploités en terrasse et dans des conditions économiques de production généralement plus onéreuses. Ces gammes de produits ont déjà été présentés dans les précédents chapitres et ne seront donc pas abordés à nouveau dans le cadre des matériaux de substitution.
- b) par ailleurs le terme matériaux de substitution peut s'appliquer aux substances naturelles ou artificielles, différents des granulats traditionnels (qui regroupent les alluvions et les roches dures concassées) mais susceptibles de les remplacer soit par dérogation aux normes soit après traitement pour leur permettre de respecter les normes.

La catégorie de matériaux de substitution qui nous intéresse dans ce chapitre se rapporte donc plus précisément aux matériaux de valorisation qui regroupent en particulier :

- les matériaux "naturels" : sous produits de carrière, calcaires tendres, sables non alluvionnaires, argiles à silex, argiles et schistes expansés, etc.
- déchets et sous-produits divers : déchets miniers et métallurgiques, matériaux de démolition, déchets industriels divers.

Seules les substances les plus couramment utilisées seront traitées dans ce mémento.

7.2 - SOUS PRODUITS DE CARRIERE

L'industrie française des granulats engendre environ 70 millions de tonnes de sous-produits, ce qui représente près de la moitié des sous-produits solides annuellement recensés.

Une partie des sous-produits de carrière sont valorisés comme granulats, il s'agit en particulier :

- des déchets d'extraction ou de découverte des gisements de pierre de taille : arène granitique des carrières de granite du massif du Sidobre (81), calcaire de découverte des exploitations marbrières de Comblanchien (21), etc.
- des stériles de traitement des granulats : sables fins récupérés, résidus de scalpages retraités.

7.3 - CALCAIRES TENDRES

Dans le Nord, le Nord-Est et le Sud-Est de la France certaines formations calcaires d'âge primaire ou secondaire présentent des caractéristiques mécaniques (LA entre 18 et 30, MDE entre 15 et 30) qui classent ces roches parmi les granulats traditionnels et sont largement utilisés en couches de chaussées et pour la confection du béton.

Il existe par ailleurs un ensemble de formations géologiques carbonatées présentant des caractéristiques mécaniques inférieures (LA < 40, MDE < 35) mais correspondent à des gisements hétérogènes discontinus ou difficiles à exploiter en particulier pour des raisons de faiblesse de puissance de gisement malgré des étendues géographiques parfois considérables.

Il s'agit en particulier de certains calcaires de l'auréole jurassique du bassin de Paris (calcaires du Barrois, du Berry, des Charentes, ...) et de calcaires tertiaires du centre du bassin de Paris (calcaires de Beauce, Champigny, Chateau-Landon). Des calcaires tendres de ce type existent également dans le Sud-Est, les Alpes ou le Jura, mais leur étude ne présente qu'un intérêt limité, dans la mesure où ils voisinent des calcaires durs, ou des roches éruptives de bonne qualité, alors que ceux énumérés précédemment constituent les meilleures roches massives de leur région.

Certains calcaires de substitution sont en outre gélifs. Ils posent par ailleurs des problèmes de maniabilité propres à toutes roches concassées (teneur en fines pour des utilisations correctes dans les bétons).

7.4 - SABLES FINS

La Région Parisienne, déficitaire en granulats traditionnels dispose de ressources géologiques considérables en sables fins (sables de Fontainebleau, sables d'Auvers, etc.). Ils sont siliceux, propres, fins à très fins (0 - 200 μ m) et mal gradués.

Ils peuvent être utilisés en technique routière comme couche de base ou de forme par traitement (apport de fillers, liants et adjuvants de prise). Leur mise en oeuvre nécessite un matériel adapté et un compactage énergique.

Tableau 23 : Exemples d'utilisation des roches tendres ou meubles et de déchets de carrière

Matériaux	Utilisations	Traitements	Précautions d'emploi
Calcaires lacustres tertiaires du Bassin parisien	<ul style="list-style-type: none"> . Viabilité - couches de fondation pour $T < T_3$ - base pour tout T - base pour $T < T_2$ - roulement pour $T < T_3$ 	aucun (graves non traitées) liants hydrauliques liants hydrocarbonés liants hydrauliques (béton)	Extraction sélective diverses qualités Chaîne d'élaboration soignée Mise au point de nouvelles formulations à cause de la réduction dimensionnelle des granulats à la mise en oeuvre et au compactage
	<ul style="list-style-type: none"> . Construction - béton hydraulique (granulat ou sable) 	nécessité de lavage complet	
Sables fins de la région parisienne	<ul style="list-style-type: none"> . Viabilité - couches de forme et de fondation depuis 1967 - couches de base $T < T_2$. Construction - bétons 	fillers pour stabilité immédiate et traficabilité liants hydrocarbonés ou hydrauliques + adjuvants (calciques, sodiques, sulfatiques)	Fabrication : protection des stocks fabrication en centrale Mise en oeuvre : matériel adapté compactage énergétique revêtement étanche
Arènes granitiques	<ul style="list-style-type: none"> . Viabilité 	liants hydrauliques (chaux, ciment) cendres volantes, ou mixtes) et pouzzolaniques	Sensibilité à l'eau traitement avant mise en oeuvre, imperméabilisation et drainage de la chaussée
Déchets d'exploitation de carrières du Nord-Pas-de-Calais	<ul style="list-style-type: none"> - <u>Produits de scalpage</u> . viabilité * remblais de grande masse * couche de forme * fondation pour T_3 et T_4* * base de T_4 ? 	Traitement à la chaux + ciment	
	<ul style="list-style-type: none"> - <u>Sols fins (limons) :</u> . viabilité * remblais massifs (exceptionnellement) * couche de forme 	--> Traitement à la chaux --> Traitement au ciment	
	<ul style="list-style-type: none"> . Construction . briques-parpaings 	- Traitement au ciment	
Sables de concassage de roches massives de Basse-Normandie	<ul style="list-style-type: none"> . viabilité - couches de fondation pour tout T - Base pour T_2 et T_3 - Renforcement sous circulation 	- Bitume - Liants hydrauliques (ciment, laitiers, cendres volantes + chaux laitier + gypse + soude, phospho-ciment) - Pas de correction granulométrique nécessaire	- Compactage énergétique - Protection superficielle - Drainage de la chaussée - Mise en oeuvre et fabrication aisées

* T : trafic, mesuré par le nombre de poids lourds par jour sur la voie la plus chargée

T_3 : < 150 poids lourds par jour

T_4 : < 50 poids lourds par jour

7.5 - GRANULATS DE LAITIERS

Ces produits sont obtenus par concassage de scories des hauts fourneaux de la sidérurgie. Ils sont utilisés en bâtiment et travaux publics au même titre que les matériaux naturels et plus particulièrement pour les couches de forme et de fondation, pour le ballast ferroviaire et dans une moindre mesure, pour le béton car la composition chimique de certains laitiers génère des réactions avec le ciment.

Ces matériaux sont élaborés dans les grands bassins sidérurgiques (Lorraine, Dunkerque, Fos). L'un des flux principaux a lieu vers la Région Parisienne.

Le laitier permet par ailleurs de confectionner par bouletage un granulats léger industriel appelé laitier bouleté présentant d'intéressantes propriétés d'isolation thermique en utilisation dans le bâtiment (blocs, panneaux, chappes...).

7.6 - SCHISTES HOUILLERS

Les cinq cents terrils houillers français constituent un stock de matériaux d'environ un milliard de tonnes. La production annuelle de schistes était de l'ordre de 8,5 Mt en 1985.

Les schistes noirs non brûlés sont principalement employés comme remblais et les schistes rouges brûlés moins sensibles aux phénomènes liés à l'eau peuvent être directement utilisés en couches de forme. Après criblage-concassage et traitement aux liants, les schistes rouges s'emploient en couche de base.

Les plus grands stocks de schistes houillers se situent dans le bassin minier du Nord-Pas-de-Calais. Le principal exploitant de schistes houillers est la Société Surschiste du Groupe CdF.

7.7 - CENDRES VOLANTES

Les centrales thermiques à charbon pulvérisé produisent annuellement quelques millions de tonnes de cendres volantes. Une partie des tonnages produits est utilisée en technique routière pour les usages suivants :

- remblais, stabilisation des sols,
- sous-couche anticontaminante,
- liant en couches de chaussée après addition de chaux (fondation et base),
- filler dans les enrobés,
- dans les bétons routiers.

Les principaux avantages des cendres sont leur coût relativement peu élevé, leurs propriétés pouzzolaniques ainsi que leur souplesse et leur facilité de mise en oeuvre.

7.8 - GRANULATS LEGERS OU MATERIAUX EXPANSES

A la différence des schistes et des cendres volantes qui sont des sous produits, il s'agit ici de matériaux nobles et coûteux. Un traitement approprié de matières premières communes (schistes-argiles-ardoises) permet de fabriquer des granulats de faible densité, de bonne résistance avec lesquels on peut produire des bétons allégés. Ces bétons légers présentent par ailleurs de très intéressantes qualités de résistance mécanique, d'isolation phonique et thermique. Les principaux types de granulats légers figurent dans le tableau 24.

7.9 - GRANULATS DE MATERIAUX DE DEMOLITION

La destruction d'ouvrages du bâtiment ou de travaux publics génère des matériaux de démolition, le plus généralement mis en décharge ou utilisés en remblais et susceptibles d'être recyclés comme granulats.

Les principaux matériaux pouvant être recyclés sont les suivants :

- les produits provenant de la démolition de bâtiments et d'ouvrages d'art en béton, pierre ou brique
- les débris des couches supérieures de chaussées "noires"
- les matériaux des chaussées de béton de ciment ou de laitier.

L'élaboration des granulats à partir de déchets de démolition doit au préalable résoudre divers problèmes technico-économiques et notamment la gestion quantitative et qualitative de la ressource : caractère épisodique des chantiers de démolition, caractère hétérogène de la nature des déchets. Les chaînes de traitement des bétons de démolition doivent en outre comporter des unités de déferrailage et d'élimination des éléments indésirables (bois, matières plastiques, matériaux d'isolation, métaux non ferreux...etc.).

En général, les caractéristiques mécaniques des bétons réalisés à l'aide de granulats recyclés sont plus faibles que les bétons originels. Sur les installations actuelles, les valeurs des coefficients Los Angeles et Deval des granulats produits sont les suivantes :

LA : 28 à 43
MDE : 15 à 24.

Le coût d'élaboration des granulats de béton de démolition est près de 2 fois plus élevé que pour les granulats traditionnels soit de l'ordre de 40 à 50 F/t.

Ces matériaux recyclés sont principalement utilisables en assise de chaussée à faible trafic.

Tableau 24 : Les différents granulats légers (source Le Granulat)

Matériau	Origine ou mode d'obtention	Centre de production	Masse volumique apparente moyenne (état sec) kg/m ³
----------	-----------------------------	----------------------	--

Matériaux naturels.

Ponce.	Naturelle, volcanique, très cellulaire, très légère à base de silice. Couleur : blanche-grise.	Iles Eoliennes (Italie) Massif-Central. Massif de l'Eifel (Rhénanie).	500/900
Pouzzolane.	Naturelle, volcanique. Les cellules sont irrégulières et plus grandes que dans la ponce. Couleur : noire ou rouge.	Massif-Central. U.S.A. U.R.S.S.	650/950

Matériaux naturels ayant subi un traitement thermique.

Argile expansée.	Naturelle + traitement thermique dans les fours rotatifs ou sur des grilles de frittage.	Tous pays.	300/900
Balle de riz frittée.	Naturelle. Frittage des cendres de balles de riz après combustion.	Essais effectués en France	
Liège expansé.	Naturelle, chênes-lièges, traitement par toréfaction.	France. Portugal.	100
Perlite expansée.	Naturelle + traitement thermique dans des fours spéciaux.	U.S.A. Canada. U.R.S.S. Nouvelle-Zélande. Japon.	50/250
Schiste expansé.	Naturelle + traitement thermique dans les fours rotatifs ou sur des grilles de frittage.	U.S.A. U.R.S.S. Allemagne. France.	500/800
Vermiculite exfoliée.	Naturelle + traitement thermique entraînant l'exfoliation. Silicates du genre mica cuits puis refroidis brusquement.	U.S.A. Afrique du Sud. U.R.S.S. Brésil.	60/250

Matériaux artificiels ne subissant pas de traitements spéciaux.

Briquillons.	Artificielle. Déchets de démolition ou déchets de l'industrie de la terre cuite.	Tous pays.	900/1 300
Mâchefer.	Artificielle : résidus des combustions de charbons.	Tous pays.	550/800

Matériaux artificiels obtenus après traitements spéciaux.

Bille de verre expansé.	Artificielle + gonflement.		350/1 200
Cendre volante frittée.	Artificielle. Cendres volantes thermiques frittées sur plateaux granuloteurs rotatifs.	Centrales thermiques.	700/950
Granulats végétaux.	Déchets de l'industrie du bois + traitement de minéralisation.	Pays européens (pins, sapins, peupliers).	500/1 000 ou 500/600
Laitier expansé.	Artificielle + traitement. Laitier de haut fourneau expansé par injection d'eau et refroidissement brusque à la coulée.	Centres sidérurgiques.	800/1 000 ou 1 400/1 600
Polystyrène expansé en billes ou pastilles pré-enrobées ou non.	Particules de polystyrène recevant ou non une couche protectrice à base de résine de farines minérales et de ciment.	République Fédérale Allemande.	

PRINCIPALES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

(Hors normes et spécifications)

- ARQUIE G. 1976 - Propriétés des granulats
Annales des mines - déc. 1976
- BERTON Y., LE BERRE P. 1980 - Méthodologie de la prospection des
matériaux de carrière -
Rapport du BRGM - 80 SGN 923 MTX
- BERTON Y., PRIMEL L. 1979 - Méthodologie des études de ressources en
granulats
Rapport de la Taxe Parafiscale sur les granulats
n° 14.EG.45
- DUBUS J.L. - Service Economique de l'UNICEM : Communications orales
(1989)
- DUPONT P., CAMUS A. 1980 - Le marché des granulats en France.
Industrie Minérale - Mines et carrières - Avril 1988
- GUIZOL C. 1985 - Aperçu général du marché national des granulats.
Industrie Minérale - Mines et Carrières - Nov. 1985
- MERMET M. 1971 - Un problème d'approvisionnement industriel et
d'environnement . Les sables et graviers d'alluvions.
- PRAX A. 1979 - Mémento substances utiles. Granulats
Rapport du BRGM 79 SGN 149 MTX
- PRAX A. 1985 - Exploitation des granulats en sites alluvionnaires,
inventaire des moyens d'extraction.
Industrie Minérale - Mines et Carrières - Déc. 1985
- PRIMEL L., TOURENQ C. 1976 - Les granulats de remplacement.
Annales des Mines - Déc. 1976
- RAY M., GUERIN M., DUPONT P. 1986 - La politique de la Direction des
Routes en matière de granulats.
Industrie Minérale - Mines et Carrières - Fév. 1986
- TOURENQ C., DENIS A. 1982 - Les essais de granulats.
Rapport de recherche du LCPC N° 114

Ouvrages collectifs ou anonymes

ARQUIE G. et Al. 1970 - Les Granulats, Traité théorique et pratique
édité par "Équipement mécanique - carrières et
matériaux"

ARQUIE G. et AL. 1980 - Granulats
Association Amicale des Ingénieurs Anciens Elèves de
l'ENPC

Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées 1977.
Granulats, Ressources et prospection de gisements
numéro spécial n° IV

Équipement mécanique - Carrières et Matériaux 1982 -
Spécial Granulats N° 203

Industrie Minérale - Mines et carrières 1987 - Le transport des
granulats, moyens, coût et choix - Juillet 1987

Industrie Minérale - Mines et carrières 1987 - Entretien avec
M. René FAVREAU. Nouveau président de l'UNPG -
Oct. 1987

Industrie Minérale - Mines et carrières - Statistiques de l'UNICEM

Symposium international de Nice sur les Granulats. 1984 -
Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de
l'Ingénieur n° 30

Union Nationale des Producteurs de Granulats 1983 - Le tableau de Bord
de la Production des Granulats, Politique
départementale - Collection Technique UNPG n° 3

Union Nationale des Producteurs de Granulats
Le Granulat n° 11 (1979)
Le Granulat n° 19 (1982)
Le Granulat n° 25 (1984)
Le Granulat n° 27 (1984)
Le Granulat n° 32 (1988)

Le Moniteur - 28 juillet 1989 - Industrie Granulats, la course aux
ressources

ANNEXE 1

Norme NF P 18-301

SOMMAIRE

	Page
1 Objet	1
2 Domaine d'application	2
3 Références	2
4 Modalités d'application	3
5 Propriétés normalisées	3
5.1 Granularité	3
5.2 Propriétés physiques	4
5.3 Propriétés physico-chimiques	5
5.4 Éléments coquilliers	6
Commentaire non homologué	7
Annexe non homologuée	8

1 OBJET

La présente norme a pour objet de fixer les spécifications auxquelles doivent répondre les granulats naturels pour bétons hydrauliques tels que définis dans la norme NF P 18-101. Les valeurs correspondantes sont données en caractères gras.

Pour certains produits ou types d'ouvrages, il peut être nécessaire — exceptionnellement pour certaines utilisations — d'adopter des valeurs différentes pour une ou plusieurs de ces spécifications. Ces valeurs sont données en italique.

La commande peut se référer seulement à une partie des spécifications de la présente norme, celles-ci devant être désignées nominativement. À défaut de telles indications, la totalité des spécifications est visée.

Sauf précisions particulières à la commande, les valeurs retenues sont celles figurant en caractères gras.

(1) *Lorsque le terme « granulat » est utilisé seul, il concerne aussi bien les sables que les gravillons et cailloux.*

(2) *Conformément à la norme NF P 18-101, un granulat est dit « naturel » s'il n'a subi aucune opération de transformation autre que mécanique (concassage, criblage).*

2 DOMAINE D'APPLICATION

La présente norme s'applique aux granulats naturels courants, de masse volumique réelle comprise entre 2 et 3 g/cm³, utilisés comme constituants des bétons hydrauliques pour tout type de construction.

Note : Certaines normes de produits actuellement en vigueur font référence à la norme NF P 18-301 (septembre 1960) annulée par la présente norme. Il est admis qu'il convient de se référer au texte périmé jusqu'aux mises à jour de ces normes de produits.

3 RÉFÉRENCES

- NF P 15-401 Liants hydrauliques — Technique des essais — Prescriptions générales.
- NF P 15-451 Liants hydrauliques — Technique des essais — Essais mécaniques — Flexion et compression.
- NF P 18-101 Granulats — Vocabulaire — Définitions — Classification.
- P 18-203 DTU 21.4 — Prescriptions techniques concernant l'utilisation du chlorure de calcium et des adjuvants contenant des chlorures dans la confection des coulis, mortiers et bétons.
- NF P 18-304 Granulométrie des granulats.
- NF P 18-400 Bétons — Moules pour éprouvettes cylindriques et prismatiques.
- NF P 18-404 Bétons — Essais d'étude, de convenance et de contrôle — Confection et conservation des éprouvettes.
- NF P 18-406 Bétons — Essai de compression.
- NF P 18-407 Bétons — Essai de flexion.
- NF P 18-554 Granulats — Mesures des masses volumiques, porosité, coefficient d'absorption et teneur en eau des gravillons et cailloux.
- NF P 18-555 Granulats — Mesures des masses volumiques, coefficient d'absorption et teneur en eau des sables.
- NF P 18-556 Granulats — Détermination de l'indice de continuité.
- P 18-557 Granulats — Éléments pour l'identification des granulats.
- NF P 18-561 Granulats — Mesure du coefficient d'aplatissement.
- NF P 18-571 Granulats — Détermination de l'homogénéité des granulats ($d \geq 4$ mm).
- NF P 18-572 Granulats — Essai d'usure Micro-Deval.
- NF P 18-573 Granulats — Essai Los Angeles.
- NF P 18-576 Granulats — Mesure du coefficient de friabilité des sables.
- NF P 18-582 Granulats — Détermination de la teneur en soufre total.
- NF P 18-583 Granulats — Mesure de la teneur en chlore — Méthode par dissolution.
- P 18-584 Granulats — Réactivité potentielle de type alcali-silice.
- P 18-585 Granulats — Essai de stabilité dimensionnelle en milieu alcalin.
- NF P 18-586 Granulats — Mise en évidence de matières organiques par colorimétrie.
- P 18-587 Granulats — Éléments coquilliers (à l'étude).
- NF P 18-591 Granulats — Détermination de la propreté superficielle.
- P 18-592 Granulats — Essai au bleu de méthylène.
- NF P 18-593 Granulats — Sensibilité au gel.
- P 18-595 Granulats — Valeur de bleu de méthylène — Méthode turbidimétrique.
- NF P 18-598 Granulats — Équivalent de sable.

4 MODALITÉS D'APPLICATION

Le producteur qui, pour la vente de ses granulats, s'est référé à la présente norme ou à un texte qui fait référence à certains de ses articles, doit être en mesure de faire la preuve que les prescriptions énumérées sont respectées, et en particulier, que les vérifications correspondantes ont été effectuées.

5 PROPRIÉTÉS NORMALISÉES

5.1 Granularité

La granularité des granulats naturels pour bétons hydrauliques est définie par la norme NF P 18-304.

5.1.1 Sables

Les sables sont caractérisés par :

- la dimension D de leur plus gros grain ;
- leur teneur en fines définie comme le passant à 0,08 mm :

Ce passant doit être inférieur à 10 % **< 10 %**

Exceptionnellement pour certaines utilisations, ce passant peut être limité à 6 %.

Cette limite ne s'applique pas à un sable très fin (sable de correction < 0,63 mm).

- pour une fourniture donnée (1) la tolérance maximale sur le Module de Finesse (MF) annoncé est de $\pm 20\%$ **Tolérance $\pm 20\%$**

Exceptionnellement pour certaines utilisations, cette tolérance est limitée à $\pm 0,3$ en valeur absolue.

- la continuité de la courbe granulométrique :

Le pourcentage retenu en masse entre deux tamis successifs de la série :
0,16 — 0,315 — 0,63 — 1,25 — 2,5 — 5

ne doit pas dépasser 40 % **< 40 %**

Cette limite ne s'applique pas à un sable très fin (sable de correction < 0,63 mm).

(1) Commentaire explicatif

Dans la plupart des cas, la qualité des bétons (maniabilité, résistance ...) justifie l'emploi d'un sable dont la granularité s'inscrit dans le fuseau ci-après :

Tamis (mm)	Passant (%)
0,16	5 à 20
0,315	15 à 40
0,63	30 à 70
1,25	55 à 90
2,5	80 à 100
5	95 à 100

Ce fuseau correspond à un Module de Finesse MF compris entre 1,8 et 3,2. Dans ces cas, un sable spécialement élaboré peut résulter d'un mélange de plusieurs sables provenant, éventuellement, de lieux de production différents, le mélange étant effectué aussi bien par le producteur que par l'utilisateur pour l'obtention d'un matériau homogène.

5.1.2 Gravillons et cailloux

Les gravillons et cailloux sont caractérisés par les valeurs d et D conformément à la norme NF P 18-304.

Lorsque $D \geq 2,5 d$, le passant à $\frac{d + D}{2}$ est compris entre $\frac{1}{3}$ et $\frac{2}{3}$.

5.2 Propriétés physiques

5.2.1 Absorption d'eau

Selon le mode opératoire défini dans les normes NF P 18-554 et NF P 18-555, la limite supérieure du coefficient d'absorption d'eau du granulat est fixée à 5 % **Ab < 5 %**

Exceptionnellement pour certaines utilisations, cette valeur est abaissée à 2 %.

5.2.2 Résistances mécaniques

Friabilité des sables

Déterminée selon la norme NF P 18-576, le seuil du coefficient de friabilité est fixé à 40 **FS ≤ 40**

Exceptionnellement pour certaines utilisations, cette valeur peut être abaissée jusqu'à 20.

Résistance au choc et à l'usure des cailloux

Elle est déterminée par les deux modes opératoires suivants :

— « Essai Los Angeles »

Selon le mode opératoire défini par la norme NF P 18-573, le seuil est fixé à 40 **LA ≤ 40**

Exceptionnellement pour certaines utilisations, cette valeur peut être abaissée jusqu'à 25.

— « Essai d'usure Micro-Deval en présence d'eau »

Selon le mode opératoire défini dans la norme NF P 18-572, le seuil est fixé à 35 **MDE ≤ 35**

Exceptionnellement pour certaines utilisations, cette valeur peut être abaissée jusqu'à 20.

5.2.3 Coefficient d'aplatissement

La forme des granulats est appréciée par la mesure du coefficient d'aplatissement défini dans la norme NF P 18-561.

Le seuil correspondant est fixé à 30 % **A ≤ 30 %**

5.2.4 Homogénéité

Selon le mode opératoire défini dans la norme NF P 18-571, le coefficient d'homogénéité est supérieur à 90 % pour $\alpha = 0,4$ **H ≥ 90 %**

Exceptionnellement pour certaines utilisations, cette valeur est portée à 97 %

5.3 Propriétés physico-chimiques

5.3.1 Impuretés prohibées

Le granulat ne doit pas contenir de particules de bois (brindilles, racines), de charbon ou de résidus divers (coke, cendres, mâchefer, braise, etc...).

5.3.2 Nature de la roche

Les granulats doivent provenir de roches identifiées comme étant insensibles au milieu environnant et non nocives en ce qui concerne les autres éléments contenus dans les bétons.

Note : En général, les références d'emploi apportent une indication suffisante sur ces propriétés.

Actuellement certaines roches vitreuses ou à structure micro-cristalline ou encore contenant des substances carbonatées magnésiennes sont susceptibles, dans certaines conditions hygrothermiques et avec des ciments riches en alcalis, de provoquer des gonflements (réaction alcali-granulat). En l'absence de référence d'emploi, il convient de faire effectuer une étude préalable par un laboratoire spécialisé.

L'identification des roches est faite par analyse pétrographique (P 18-557) et détermination de l'indice de continuité (NF P 18-556).

L'insensibilité aux agents atmosphériques est estimée d'après les résultats :

- de l'essai d'usure Micro-Deval en présence d'eau (voir paragraphe 5.2.2) ;
- de l'essai de sensibilité au gel (NF P 18-593) : la baisse de résistance de l'échantillon soumis aux cycles de gel par rapport au témoin ne doit pas dépasser 50 % ;
- et des essais de réaction alcali-granulat (voir normes P 18-584 et P 18-585).

5.3.3 Propreté des sables

La propreté des sables est déterminée à vue selon la norme NF P 18-598 sur la fraction 0/5 mm.

- La limite inférieure sauf pour les sables de concassage ou de broyage, est fixée à 75 **ESV ≥ 75**
- Pour les sables de concassage ou de broyage, la limite est fixée à 65 **ESV ≥ 65**

Exceptionnellement pour certaines utilisations, ces valeurs peuvent être portées à 80.

Toutefois, les sables dont l'ESV est inférieur à ces valeurs sont conformes à la présente norme si la valeur de bleu selon la norme P 18-595 est ≤ 1 g pour 100 g de fines.

5.3.4 Propreté des gravillons

La propreté des gravillons est déterminée selon la norme NF P 18-591. Le seuil fixé pour le passant à 0,5 mm est de 2 % **P ≤ 2 %**

La valeur du passant à 0,5 mm peut être de 5 % pour un gravillon concassé mais le résultat de l'essai au bleu doit satisfaire aux conditions indiquées à l'article 5.3.3 (1).

(1) L'essai au bleu est effectué selon la norme P 18-592 mais en cas de litige ou de doute, la méthode de la norme P 18-595 est appliquée.

5.3.5 Sulfates et sulfures

Les granulats peuvent contenir de faibles quantités de sulfates et de sulfures, sous réserve que leur teneur en soufre total, exprimée en anhydride sulfurique SO_3 déterminée selon la norme NF P 18-582, ne dépasse pas 0,4 % en masse et que la répartition de ces impuretés soit uniforme (1).

Teneur $\text{SO}_3 \leq 0,4 \%$

Note : La présence de pyrite ou de marcassite sous forme de grains de dimensions supérieures à 2 mm rend les granulats impropres à la confection de bétons pour lesquels on attache une importance à l'apparence. Dans ce cas, une clause à cet effet doit être précisée lors de la commande.

5.3.6 Matières organiques (sables)

La présence de matières organiques est déterminée selon la norme NF P 18-586. Elle ne doit être qu'en proportion suffisamment faible pour que l'essai colorimétrique donne une coloration moins foncée que la couleur type.

En cas de coloration plus intense que celle du témoin, des essais comparatifs sur mortier composé d'une partie de liant et trois parties de sable avec rapport eau/ciment = 0,5 en utilisant d'une part le sable concerné et d'autre part ce même matériau après élimination des matières organiques, doivent être effectués.

Les résistances mécaniques obtenues avec le sable concerné doivent atteindre, à deux jours d'âge, au moins 90 % de celles obtenues à partir du sable traité.

5.3.7 Teneur en chlorures

La teneur en ions-chlorure est déterminée conformément à la norme NF P 18-583.

Le fournisseur doit donner la teneur maximale en ions-chlorure des produits qu'il livre (2) lorsqu'elle dépasse 0,1 % et doit pouvoir la donner sur demande lorsque celle-ci est inférieure à 0,1 %.

5.4 Éléments coquilliers

5.4.1 Teneur en éléments coquilliers

Les teneurs en éléments coquilliers doivent être limitées et le mode opératoire est défini par la norme P 18-587 (à l'étude).

En attendant cette définition, on s'en tient aux valeurs suivantes (exprimées en masse) :

Sables

— fragments de coquillages $\leq 30 \%$

Gravillons et cailloux

— coquillages creux $\leq 5 \%$

— fragments de coquillages plats $\leq 10 \%$

5.4.2 Influence sur les résistances mécaniques

De plus, l'influence sur les résistances mécaniques des bétons est déterminée par des essais comparatifs

(1) Si ces conditions ne sont pas respectées, certaines précautions doivent être prises, notamment en ce qui concerne le choix du ciment et la compatibilité des granulats avec les composants du béton qui est à vérifier.

(2) Il est rappelé que la teneur globale en chlorures de tous les constituants du béton ne doit pas dépasser les valeurs mentionnées dans le DTU 21.4 (P 18-203)

Pour les sables :

Les résistances doivent atteindre au moins 80 % de celles obtenues avec le mortier normal.

La préparation des éprouvettes d'essais et le contrôle des résistances mécaniques sont effectués selon les normes NF P 15-401 et NF P 15-451.

Pour les gravillons et cailloux :

Les essais doivent être effectués sur des éprouvettes de béton confectionnées à l'aide de sable de référence et des gravillons et cailloux à examiner :

- d'une part à l'état brut,
- d'autre part débarrassés par triage des éléments coquilliers.

Les résistances des éprouvettes confectionnées avec les granulats bruts doivent atteindre 85 % des résistances obtenues avec les granulats débarrassés des éléments coquilliers.

La réalisation des éprouvettes et le contrôle des résistances mécaniques sont effectués selon les normes NF P 18-400 — NF P 18-404 — NF P 18-406 — NF P 18-407.

COMMENTAIRE NON HOMOLOGUÉ

Désignation d'un granulat

La désignation d'un granulat comprend dans l'ordre les indications suivantes :

- granularité,
- masse volumique réelle,
- origine,
- mode de préparation,
- référence à la présente norme,
- dans certains cas particuliers, désignation de la ou des propriétés pour lesquelles une valeur déterminée est demandée .

Exemples de désignation

Sable 0/6,3 courant, marin, NF P 18-301.

Gravillon 6,3/20 courant, naturel, semi-concassé, NF P 18-301, (coefficient d'absorption d'eau < 2 %).

ANNEXE NON HOMOLOGUÉE**CONDITIONS DE RÉCEPTION
APPLICABLES AUX FOURNITURES DE GRANULATS NATURELS
POUR BÉTONS HYDRAULIQUES LIVRÉS EN VRAC****A.1 Objet**

La présente annexe a pour objet de définir les règles applicables, sauf accord particulier entre l'acquéreur et le fournisseur, à la formation de lots de contrôle pour la réception d'une fourniture de granulats ainsi qu'à la constitution d'échantillons de ces granulats, aux fins de vérifications de leur conformité aux spécifications de la norme.

A.2 Généralités**A.2.1 Définitions**

Ces définitions s'appliquent aux granulats répondant à une même désignation (voir commentaire non homologué à la fin de la présente norme).

- Fourniture : Quantité de granulats correspondant à une seule et même commande, constituée d'un certain nombre de lots.
- Lot : Quantité de granulats soumise éventuellement à une opération de contrôle de réception par échantillonnage.
- Prélèvement : Quantité de granulats extraite du lot en une seule fois.
- Échantillon global : Quantité de granulats constituée par l'ensemble des prélèvements.
- Échantillon d'essai : Quantité de granulats obtenue à partir de l'échantillon global et destinée aux essais.

A.2.2 Contrôle de réception

Les conditions de réception ne s'appliquent qu'aux lots homogènes provenant d'une même unité de production.

La réception porte couramment sur la granularité (article 5.1) et sur la propreté (articles 5.3.3 et 5.3.4).

L'acquéreur ne peut demander qu'il soit procédé à une réception systématique plus complète que la granularité et la propreté que s'il en a, au préalable, informé par écrit le fournisseur sur sa lettre de commande, en précisant également les modalités, la fréquence et les délais nécessaires à l'exécution des essais.

Toutefois, en cas de besoin, l'acquéreur peut demander, en cours de livraison, d'effectuer la vérification d'autres caractères définis dans la norme.

A.2.3 Date et lieu de réception

Sauf procédure particulière fixée lors de la commande, la réception est effectuée au moment de la prise en charge des lots par l'acheteur, c'est-à-dire, soit chez le fournisseur, soit sur le lieu de livraison lorsque le transport est assuré par le fournisseur.

Si elle est effectuée chez le fournisseur, la date en est fixée d'un commun accord, l'acquéreur y est présent ou représenté.

Si elle est effectuée sur le lieu de la livraison, le fournisseur doit être prévenu pour assister aux opérations de réception ou s'y faire représenter.

A.3 Réception

A.3.1 Constitution des lots et nombre d'essais

La constitution des lots soumis aux conditions de réception ainsi que le nombre d'essais à effectuer par lot relèvent d'un accord entre fournisseur et acquéreur.

A.3.2 Prélèvement dans les lots

A.3.2.1 Nombre de prélèvements

Le nombre de prélèvements constituant l'échantillon global est contractuel et est au minimum de 10.

Si les livraisons sont régulièrement espacées dans le temps, l'acquéreur et le fournisseur peuvent convenir de n'effectuer les prélèvements que tous les « n » lots, le nombre « n » étant fixé par l'acquéreur en fonction de l'organisation de l'unité de production et du contrôle exercé par le fournisseur.

A.3.2.2 Points de prélèvements

La règle générale à observer consiste à répartir aussi uniformément que possible les points de prélèvements dans l'ensemble du lot soumis au contrôle de réception.

Les prélèvements sur courant de granulats doivent être régulièrement répartis dans le temps. Ils doivent être effectués conformément aux indications de la norme NF P 18-552.

Un procédé de prélèvement à caractère automatique doit être utilisé de préférence.

A.3.2.3 Constitution de l'échantillon global

Exemple d'échantillons (voir norme NF P 18-552)

Dimensions nominales maximales des granulats (mm)	Masse approximative minimale de l'échantillon (kg)
2,5	10
5	10
10	20
20	40
40	80
63	120
80	200

A.3.2.4 Constitution de l'échantillon d'essai

Sur l'échantillon global dont la masse est indiquée dans le tableau au paragraphe A.3.2.3, procéder à l'opération du quartage telle que décrite dans la norme NF P 18-553 pour obtenir la masse de l'échantillon pour le ou les essai(s) prescrit(s) à la commande.

Les granulats non utilisés pour la constitution de l'échantillon d'essai peuvent être réintroduits dans l'échantillon global.

A.3.2.5 Modes opératoires et nombre d'essais

Les essais sont effectués conformément aux normes d'essais correspondantes.

A.3.3 Conditions de conformité

Tous les essais prescrits lors de la commande ou effectués en cas de besoin en cours de livraison proviennent d'un même échantillonnage et leurs résultats doivent être conformes aux prescriptions de la norme.

Si, pour l'un des caractères normalisés, le résultat d'un essai n'est pas conforme aux prescriptions de la norme, dans le cadre des spécifications de la commande, il pourra être procédé à deux contre-épreuves pour cet essai à partir de deux nouveaux échantillons prélevés dans le même lot.

Si le résultat d'une de ces contre-épreuves est encore défavorable, la livraison est réputée non conforme.

Si le résultat des deux contre-épreuves est favorable, la livraison entière est réputée conforme.

A.3.4 Choix du laboratoire

Les essais sont effectués, soit dans le laboratoire désigné à la commande, soit à défaut d'une telle désignation et en cas de nécessité, dans un laboratoire choisi d'un commun accord par le fournisseur et par l'acquéreur.

RÉFÉRENCES

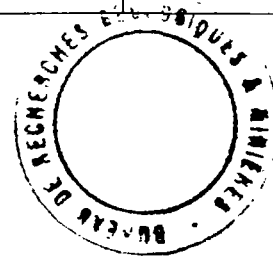
NF P 18-552 Prélèvement de matériaux en cours d'écoulement.

NF P 18-553 Préparation d'un échantillon pour essai.

ANNEXE 2

Norme NF P 18-321

SOMMAIRE



	Page
1 Généralités	1
1.1 Objet	1
1.2 Domaine d'application	1
1.3 Références	2
1.4 Définitions	2
2 Caractéristiques des granulats	2
2.1 Caractéristiques intrinsèques	2
2.2 Caractéristiques de fabrication	3
2.3 Caractéristiques complémentaires	3
3 Catégories de gravillons	3
4 Catégories de sables	4
5 Granularité	4
Commentaires non homologués N° 1 et N° 2	5

1 GÉNÉRALITÉS**1.1 OBJET**

La présente norme a pour objet de définir des catégories de granulats en fonction de leurs caractéristiques intrinsèques et de leurs caractéristiques de fabrication.

1.2 DOMAINE D'APPLICATION

La présente norme s'applique à des granulats destinés aux travaux routiers et aéroportuaires, à l'exclusion des couches de chaussées en béton hydraulique (1).

(1) Les granulats pour chaussées en béton sont visés par la norme NF P 18-301 (en révision):
Granulats naturels pour bétons hydrauliques.

1.3 RÉFÉRENCES

NF P 18-101 (en préparation)	Termes, définitions, classification.
NF P 18-304 (décembre 1973)	Granulométrie des granulats.
NF P 18-552 (décembre 1981)	Prélèvements de matériaux en cours d'écoulement.
NF P 18-553 (octobre 1978)	Préparation d'un échantillon pour essai.
NF P 18-554 (décembre 1978)	Mesures des masses volumiques, porosité, coefficient d'absorption et teneur en eau des gravillons et cailloux.
NF P 18-555 (avril 1980)	Mesures des masses volumiques, coefficient d'absorption et teneur en eau des sables.
NF P 18-556 (avril 1980)	Détermination de l'indice de continuité.
P 18-557 (décembre 1980)	Éléments pour l'identification des granulats.
NF P 18-560 (octobre 1978)	Analyse granulométrique par tamisage.
NF P 18-561 (octobre 1978)	Mesure du coefficient d'aplatissement.
NF P 18-562 (février 1981)	Détermination de l'épaisseur moyenne des gravillons.
P 18-563 (février 1981)	Détermination du coefficient d'écoulement des gravillons.
P 18-564 (février 1981)	Détermination du coefficient d'écoulement des sables.
NF P 18-565 (décembre 1981)	Détermination de l'indice des Vides Rigden.
NF P 18-571 (avril 1979)	Détermination de l'homogénéité des granulats ($d \geq 4$ mm).
NF P 18-572 (octobre 1978)	Essai d'usure micro-Deval.
NF P 18-573 (octobre 1978)	Essai Los Angeles.
NF P 18-574 (avril 1979)	Essai de fragmentation dynamique.
NF P 18-575 (décembre 1979)	Mesure du coefficient de polissage accéléré des gravillons.
NF P 18-576 (octobre 1978)	Mesure du coefficient de friabilité des sables.
NF P 18-578 (décembre 1979)	Mesure de la rugosité d'une surface à l'aide du pendule de frottement.
NF P 18-586 (février 1981)	Mise en évidence de matières organiques par colorimétrie.
NF P 18-591 (avril 1980)	Détermination de la propreté superficielle.
P 18-592 (juillet 1980)	Essai au bleu de méthylène.
NF P 18-593 (octobre 1978)	Sensibilité au gel.
NF P 18-597 (décembre 1979)	Détermination de la propreté des sables équivalent de sable à 10 % de fines.
X 11-680 (juin 1980)	Granulométrie — Tirage par fluides — Analyse granulométrique par sédimentation, par gravité dans un liquide.

1.4 DÉFINITIONS

Il convient, pour les définitions relatives aux granulats, de se référer aux normes NF P 18-101 et NF P 18-304. Néanmoins, certaines d'entre elles sont précisées ci-après.

Les éléments inférieurs ou égaux à 0,080 mm sont appelés « fines ».

Les « sables » sont les granulats d/D dont le d est compris entre 0 et 1 mm et le D est inférieur ou égal à 6,3 mm.

Les « gravillons » sont les granulats d/D dont le d est supérieur ou égal à 1 mm et le D inférieur ou égal à 31,5 mm.

Les « graves » sont les granulats O/D à granularité continue dont le D est supérieur à 6,3 mm et inférieur ou égal à 80 mm.

Ces dimensions sont données par des tamis de contrôle à mailles carrées.

2 CARACTÉRISTIQUES DES GRANULATS

2.1 CARACTÉRISTIQUES INTRINSÈQUES

La norme retient comme caractéristiques intrinsèques des granulats celles dépendant principalement de la nature de la roche :

— le coefficient Los Angeles (LA)

- le coefficient micro-Deval en présence d'eau (MDE)
- le coefficient de polissage accéléré (CPA)

2.2 CARACTÉRISTIQUES DE FABRICATION

La norme retient comme caractéristiques liées à leur fabrication

- pour les gravillons :
 - la granularité (Gr),
 - le coefficient d'aplatissement (A) ou l'épaisseur moyenne (EM),
 - la propreté superficielle (P) (voir NF P 18-591).
- pour les sables :
 - la granularité (Gr),
 - la propreté des sables : Équivalent de sable à 10 % de fines : ES 10 % et éventuellement la valeur de bleu (VB).

2.3 CARACTÉRISTIQUES COMPLÉMENTAIRES

D'autres caractéristiques d'essais normalisées ou de définitions telles que :

- sensibilité au gel, homogénéité, coefficient d'écoulement, coefficient de friabilité des sables, indice et rapport de concassage etc. peuvent, le cas échéant, faire l'objet de spécifications complémentaires.

3 CATÉGORIES DE GRAVILLONS

L'association des caractéristiques permet de ranger les gravillons dans l'une des catégories définies dans les tableaux ci-dessous.

3.1 TABLEAU DES CARACTÉRISTIQUES INTRINSÈQUES

Catégorie	LA	MDE
A	≤ 15	≤ 10
B	≤ 20	≤ 15
C	≤ 25	≤ 20
D	≤ 30	≤ 25
E	≤ 40	≤ 35

Une compensation entre LA et MDE est possible dans la limite de 5 unités.

Lorsque, pour certains cas, le CPA doit être pris en compte, sa valeur doit être :

- ≥ 0,55 pour la catégorie A
- ≥ 0,50 pour les autres catégories

Toutefois, si les valeurs du CPA sont inférieures de 0,01 à 0,05 à celles indiquées ci-dessus, une compensation limitée à 5 unités est admise entre LA + MDE et 100 CPA (1).

(1) Par exemple : « Un granulat ayant un CPA de 0,47 peut être accepté en catégorie B s'il a un LA de 19 et un MDE DE 13 ».

Inversement si $LA + MDE$ est supérieur aux valeurs indiquées ci-dessus, on pourra admettre une compensation par 100 CPA dans la limite de 5 unités (1).

3.2 TABLEAU DES CARACTÉRISTIQUES DE FABRICATION

Catégorie	Gr	A (2) ou E_m		P
I	Voir chapitre 5	≤ 10	$\geq \frac{D + d}{3}$	$\leq 0,50$
I bis		≤ 15	$\geq \frac{D + d}{3,5}$	≤ 1
II		≤ 20		≤ 2
III		≤ 30		≤ 3

Dans certains cas, les spécifications des caractéristiques de fabrication peuvent être limitées à celle de la granularité.

4 CATÉGORIES DE SABLES

4.1 TABLEAU DES CARACTÉRISTIQUES DE FABRICATION

Catégorie	Gr	ES 10 %
a	Voir chapitre 5	≥ 60
b		≥ 50
c		≥ 40

Pour la propreté des sables, si ES 10 % est inférieur à la valeur spécifiée, la valeur de bleu VB doit être :

- ≤ 1 pour que le sable soit classé en catégorie a,
- $\leq 1,5$ pour que le sable soit classé en catégorie b,
- ≤ 2 pour que le sable soit classé en catégorie c.

Ces caractéristiques sont applicables aux sables des graves.

5 GRANULARITÉ

Le fuseau de régularité doit :

5.1 Être situé dans la zone définie par la norme NFP 18-304 dont les dispositions principales sont rappelées ci-après :

- pour les gravillons :
 - refus à 1,58 D nul,
 - refus à D et tamisat à $d \cdot 1$ à 15 %, cette valeur étant portée à 20 % si $D \geq 1,58 d$,
 - tamisat à $0,63 d < 3$ % cette valeur sera portée à 5 % si $D \leq 5$ mm.

(1) En fonction des conditions locales, voir commentaire non homologué N° 1.

(2) Pour les granularités inférieures à 10 mm la valeur de A sera majorée de 5

— pour les sables et les graves :

- refus à 1,58 D nul,
- refus à D : 1 à 15 %.

5.2 Satisfaire aux spécifications complémentaires suivantes :

— pour les gravillons :

- l'étendue maximale du fuseau de régularité doit être de 10 % à d et D et de 25 % à $\frac{D + d}{2}$
- Dans le cas où $D \geq 2,5 d$, $\frac{D - d}{2}$ doit être compris entre 1/3 et 2/3.
- le refus à 1,25 D doit être nul pour les catégories I et I bis.

— pour les sables et les graves livrés en une seule fraction, l'étendue du fuseau de régularité doit être de :

- 10 % pour D et pour le tamis de 0,5 mm,
- 15 % aux tamis intermédiaires : 2 ; 4 ; 6,3 ; 8 ; 10 ; 14 ; 20 mm.
- 4 % à 0,080 mm si la teneur en fines est < à 12 %,
- 6 % à 0,080 mm si la teneur en fines est \geq à 12 %.

5.3 Les niveaux de teneur en fines des sables pourront être spécifiés en choisissant entre les niveaux suivants : 6 ; 12 ; 18 ; 24 ; 30.

COMMENTAIRES NON HOMOLOGUÉS

N° 1 Voir paragraphe 3.1

Cette rédaction a été introduite pour tenir compte des conditions de circulation avec des pneus à crampons.

N° 2 Modalités de désignation du granulat

— les gravillons sont désignés :

- par les valeurs de D et d,
- par deux symboles : BII par exemple, l'une (B) définissant ses caractéristiques intrinsèques, LA, MDE, et CPA s'il y a lieu et l'autre (II) ses caractéristiques de fabrications Gr et A, Em et P s'il y a lieu.

— les sables sont désignés :

- par la valeur de D. Il convient en plus de préciser le niveau de fines choisi et la position du fuseau de régularité à un ou plusieurs tamis intermédiaires,
- par un symbole : a par exemple définissant ses caractéristiques de fabrication Gr et ES 10 %.

— les graves sont désignées :

- par la valeur D,
- par les caractéristiques du sable et du gravillon qui les composent.