

Granulats classiques

Version du 26 juin 2013

1	Définition.....	1
2	Lois, normes, guides.....	1
3	Origine, élaboration, stockage.....	6
4	Caractéristiques physico-chimiques.....	10
5	Caractéristiques géotechniques.....	12
6	Caractéristiques environnementales.....	13
7	Aspects sanitaires.....	14
8	Usages (Types d'infrastructures).....	15
9	Références bibliographique.....	23
10	Auteurs et relecteurs.....	24

1 Définition

Les matériaux et granulats objets de cette rubrique sont produits à partir des roches et des sols courants. Les techniques utilisées pour la construction des infrastructures routières ont été développées et validées avec ces matériaux et granulats. Parallèlement, certains des procédés de préparation, et d'emploi des matériaux objet des autres rubriques de l'observatoire OFIR se sont développés à partir de ces techniques.

D'une façon générale, selon l'usage auquel ils sont destinés, on parlera de :

- « sols » et « matériaux rocheux » (dans le cas d'une utilisation en terrassements, c'est à dire en remblais ou couches de forme)
- « granulats » (dans le cas d'une utilisation en couche structurelle de chaussées).

Cette distinction est liée aux normes qui régissent les travaux dans ces deux domaines d'applications.

2 Lois, normes, guides

2.1 Lois

Quelques textes réglementaires s'appliquent aux carrières : :

- Partie législative du [code de l'environnement, dont le livre V titre Ier chapitre II section 1](#) définit les procédures de délivrance d'autorisation aux installations classées pour la protection de l'environnement – ICPE (voir en particulier les [articles L512-1 à L512-6-1](#) ainsi que [l'article L515-1](#) spécifique aux carrières)
- Partie réglementaire du code de l'environnement, dont le livre V titre Ier chapitre I section 2 article R511-9 et son [annexe](#) définissent la liste des activités ou substances classées en rubriques ainsi que le seuil de classement applicable à chaque rubrique (seuil « soumis à autorisation » dans le cas de carrières). Voir en particulier les [rubriques n° 2510](#) (exploitation de carrières), [n° 2515](#) (broyage, concassage, criblage, ensachage, pulvérisation, nettoyage, mélange

de pierres, cailloux, minerais et autres produits minéraux naturels ou artificiels) et [n°2517](#) (station de transit de produits minéraux solides,

- code de l'urbanisme, notamment [l'article R.123-13](#) qui définit les périmètres de zones spéciales de recherche et d'exploitation de carrières dans le PLU et [l'article L.130-1](#) pour l'autorisation de défrichage,
- Règlement Général des Industries Extractives, Journal Officiel, 1996 mis à jour janvier 2011.

A ces textes s'ajoute un recueil intitulé « [Réglementation applicable aux exploitations de carrières](#) », édité par le Ministère de l'Ecologie, du développement durable et de l'énergie, qui traite de la sécurité et de l'hygiène dans les carrières à ciel ouvert et a fait l'objet d'une mise à jour.

2.2 Normes

Les granulats ont des utilisations très diverses. Il est donc utile de connaître leurs caractéristiques mécaniques (résistances au choc et à l'usure), géométriques (granularité, angularité, propreté...) ainsi que leurs propriétés chimiques et leur altérabilité pour s'assurer de leur aptitude à être employés avec ou sans liant (la physicochimie intervient) dans des couches sollicitées mécaniquement à des niveaux divers.

Normes Produits :

- NF EN 12620 : Granulats pour bétons
- NF EN 13 043 : Granulats pour mélanges hydrocarbonés et pour enduits superficiels utilisés dans la construction des chaussées, aérodromes et autres zones de circulation
- NF EN 13 055-1 Granulats légers - Partie 1 : granulats légers pour bétons et mortiers
- NF EN 13 139 : Granulats pour mortiers
- NF EN 13 242 : Granulats pour matériaux traités aux liants hydrauliques et matériaux non traités utilisés pour les travaux de génie civil et construction de chaussée
- NF EN 13 383-1 : Enrochements – Partie 1 : spécifications
- NF EN 13 450 : Granulats pour ballasts de voies ferrées
- NF P 18-545 : Granulats - Éléments de définition, conformité et codification, 2011

Propriétés générales des granulats :

- NF EN 932-1 : Essais pour déterminer les propriétés générales des granulats – Partie 1 : Méthodes d'échantillonnage
- NF EN 932-2 : Essais pour déterminer les propriétés générales des granulats – Partie 2 : Méthodes de réduction d'un échantillon de laboratoire
- NF EN 932-3 : Essais pour déterminer les propriétés générales des granulats – Partie 3 : Procédure et terminologie pour la description pétrographique simplifiée
- NF EN 932-5 : Essais pour déterminer les propriétés générales des granulats – Partie 5 : Equipements communs et étalonnage

- NF EN 932-6 : Essais pour déterminer les propriétés générales des granulats – Partie 6 : Définitions de la répétabilité et de la reproductibilité

Caractéristiques géométriques des granulats :

- NF EN 933-1 : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – Partie 1 : Détermination de la granularité – Analyse granulométrique par tamisage
- NF EN 933-2 : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – Partie 2 : Détermination de la granularité – Tamis de contrôle, dimensions nominales des ouvertures
- NF EN 933-3 : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – Partie 3 : Détermination de la forme des granulats – Coefficient d'aplatissement
- NF EN 933-4 : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – Partie 4 : Détermination de la forme des granulats – Indice de forme
- NF EN 933-5 : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – Partie 5 : Détermination du pourcentage de surfaces cassées dans les gravillons
- NF EN 933-6 : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – Partie 6 : Evaluation des caractéristiques de surface – Coefficient d'écoulement des granulats
- NF EN 933-7 : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – Partie 7 : Détermination de la teneur en éléments coquilliers - Pourcentage des coquilles dans les gravillons
- NF EN 933-8 : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – Partie 8 : Evaluation des fines – Equivalent de sable
- NF EN 933-9 : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – Partie 9 : Qualification des fines – Essai au bleu de méthylène
- NF EN 933-10 : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – Partie 10 : Détermination des fines – Granularité des fillers (tamisage dans un jet d'air)
- NF EN 933- 11 : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – Partie 11- Essai de classification des constituants de gravillons recyclés

Caractéristiques mécaniques et physiques des granulats :

- NF EN 1097- 1 : Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats – Partie 1 : Détermination de la résistance à l'usure (micro-Deval)
- NF EN 1097- 2 : Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats – Partie 2 : Méthodes pour la détermination de la résistance à la fragmentation
- NF EN 1097- 3 : Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats – Partie 3 : Méthode pour la détermination de la masse volumique en vrac et de la porosité intergranulaire

- NF EN 1097- 4 : Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats – Partie 4 : Détermination de la porosité du filler sec compacté
- NF EN 1097- 5 : Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats – Partie 5 : Détermination de la teneur en eau par séchage en étuve ventilée
- NF EN 1097- 6 : Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats – Partie 6 : Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau
- NF EN 1097- 7 : Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats – Partie 7 : Détermination de la masse volumique absolue du filler – Méthode au pycnomètre
- NF EN 1097- 8 : Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats – Partie 8 : Détermination du coefficient de polissage accéléré
- NF EN 1097- 9 : Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats – Partie 9 : Méthode pour la détermination de la résistance à l'usure par abrasion provoquée par les pneus à crampons – Essai scandinave
- NF EN 1097- 10 : Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats – Partie 10 : hauteur de succion d'eau

Propriétés thermiques et altérabilité des granulats :

- NF EN 1367- 1 : Essais de détermination des propriétés thermiques et de l'altérabilité des granulats – Partie 1 : Détermination de la résistance au gel-dégel
- NF EN 1367-2 : Essais pour déterminer les propriétés thermiques et l'altérabilité des granulats - Partie 2 : Essai au sulfate de magnésium
- NF EN 1367- 3 : Essais pour déterminer les propriétés thermiques et l'altérabilité des granulats – Partie 3 : Essai d'ébullition pour basalte « coup de soleil »
- NF EN 1367- 4 : Essais pour déterminer les propriétés thermiques et l'altérabilité des granulats – Partie 4 : Détermination du retrait au séchage
- NF EN 1367- 5 : Essais pour déterminer les propriétés thermiques et l'altérabilité des granulats – Partie 5 : Détermination de la résistance au choc thermique
- NF EN 1367- 6 : Essais pour déterminer les propriétés thermiques et l'altérabilité des granulats – Partie 3 : Résistance au gel-dégel au contact du sel (NaCl)

Propriétés chimiques des granulats :

- NF EN 1744- 1 : Essais visant à déterminer les propriétés chimiques des granulats – Partie 1 : Analyse chimique
- NF EN 1744- 3 : Essais pour déterminer les propriétés chimiques des granulats – Partie 3 : Préparation d'éluats par lixiviation des granulats, 2002
- NF EN 1744- 4 : Essais pour déterminer les propriétés chimiques des granulats – Partie 4 : Détermination de la sensibilité à l'eau des fillers pour mélanges bitumineux

- NF EN 1744- 5 : Essais pour déterminer les propriétés chimiques des granulats – Partie 5 : Détermination des sels chlorures solubles dans l'acide
- NF EN 1744- 6 : Essais pour déterminer les propriétés chimiques des granulats – Partie 6 : Détermination de l'influence d'un extrait de granulats recyclés sur le temps de prise initial du ciment

Autres essais :

- NF EN 196-2 : Méthodes d'essai des ciments – Détermination de la teneur en chlorure, en dioxyde de carbone et en alcalis dans les ciments
- NF EN 1926 : Méthodes d'essai pour pierres naturelles - Détermination de la résistance en compression uniaxiale
- NF EN 13179-1 : Essais sur les fillers utilisés dans les mélanges bitumineux – Partie 1 : Essai bille-anneau
- NF EN 13383-2 : Enrochements – Partie 2 : Méthodes d'essai
- FD P 18-542 : Granulats - Critères de qualification des granulats naturels pour béton hydraulique vis-à-vis de l'alcali-réaction
- XP P 18-566 : Granulats – Analyse granulométrique, aplatissement et allongement – Essai à l'aide d'un appareil d'ombroscopie
- NF P 18-576 : Granulats - Détermination du coefficient de friabilité du sable
- XP P 18-580 : Granulats – Détermination de la résistance au polissage accéléré des gravillons – Méthode par projection
- XP P 18-594 : Granulats - Méthodes d'essai de réactivité aux alcalins
- NF P 94-067 : Sols : reconnaissance et essais - Coefficient de dégradabilité des matériaux rocheux

- NF P 18-557 : Granulats – Eléments pour l'identification des granulats, 1990
- NF ISO 565 : Tamis de contrôle – Tissus métalliques, tôles métalliques perforées et feuilles électroformées -. Dimension nominale des ouvertures, 1990
- FD P 18-663 : Granulats - Modalités d'application des normes NF EN d'essai sur les granulats
- FD P 18-662 : Granulats - Guide d'utilisation des normes NF EN 13383-1 et NF EN 13383-2
- NF ISO 5725 : Parties 1 à 6 : Application de la statistique – Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesure

2.3 Guides

En travaux publics, les matériaux et granulats sont classés selon des critères normalisés, et les règles d'utilisation des classes ainsi définies sont spécifiées par certains maîtres d'ouvrages. Les spécifications de loin les plus utilisées sont celles éditées par l'Etat pour le réseau routier national, ce qui n'empêche en rien les autres maîtres d'ouvrages d'éditer leurs propres spécifications. On ne traitera ici que de ceux des services centraux du ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, qui servent de référence pour l'utilisation de ces matériaux :

- LCPC, SETRA (1981), Manuel de conception des chaussées neuves à faible trafic.
- SETRA- LCPC (2000 2^{ème} édition), guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme. Guide Technique D 9233, encore appelé couramment GTR dans le réseau du développement durable.
- LCPC, SETRA (1994), Conception et dimensionnement des structures de chaussées. Guide Technique D9511.
- LCPC, SETRA (1994), Guide d'application des normes pour le réseau routier national. Enrobés hydrocarbonés à chaud.
- LCPC, SETRA (1997), Guide technique. Enduits superficiels d'usure.
- LCPC, SETRA (1997), Guide technique. Chaussées en béton.
- LCPC, SETRA (1998), Guide d'application des normes pour le réseau routier national. Assises de chaussées.
- LCPC, SETRA (2000), Traitement des sols à la chaux et / ou aux liants hydrauliques. Guide Technique, appelé GTS dans le réseau du ministère du développement durable.
- Ministère de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement Durables (arrêté du 31/08/2007), Cahier des clauses techniques générales.
- Fascicule 23 (2007). Fourniture de granulats employés à la construction et à l'entretien des chaussées.
- SETRA (1999), Répertoire des textes réglementaires et techniques- Chaussées, terrassements.
- SETRA (2008): Guide technique - Utilisation des normes « enrobés à chaud »
- SETRA (2006): Guide technique - Fabrication des enrobés à chaud en continu - L'expérience française
- SETRA (2005): Fiche et note d'information - Enduits superficiels d'usure (ESU)- Enrobés coulés à froid (ECF)
- SETRA (2005): Fiche et note d'information - Aide au choix des granulats pour chaussées basée sur les normes européennes
- SETRA (2004): Guide technique - Moyens et critères de réception des matériaux mis en œuvre en chaussée
- SETRA (2004): Guide technique - Retraitement des chaussées et recyclage des matériaux bitumineux des chaussées
- SETRA (2003): Guide technique - Aide au choix des techniques d'entretien des couches de surface des chaussées

3 Origine, élaboration, stockage

3.1 Matière première

Les matériaux et granulats objets de cette rubrique sont produits à partir des roches et des sols courants :

- Les roches massives en place sont regroupées selon leur mode de formation : magmatiques (volcaniques ou plutoniques), métamorphiques ou sédimentaires.

Viennent ensuite des « sous-groupes » liée à leur nature (pétrographique, minéralogique, chimique).

- L'altération de ces roches par les agents atmosphériques (pluie, gel, neige, vent, soleil..) modifie leur structure et leur minéralogie, la désagrégation ainsi effectuée conduisant à la formation de sols à des échelles de temps très variables.
- Enfin, le déplacement des grains de sols (par les rivières essentiellement), puis leur sédimentation conduit à la formation d'autres sols ou roches meubles.

Les **granulats** sont issus de l'exploitation et du traitement des roches (roches meubles dans le cas des granulats alluvionnaires, roches massives dans les autres cas). La norme EN 932-3 – Description pétrographique simplifiée - donne des indications sur la nature et la texture des roches utilisables à des fins de production de granulats.

Les **matériaux** pour les terrassements sont des sols (classes A, B, C, D de la norme NF P 11-300) ou des roches (classe R de la même norme).

3.2 Processus de fabrication.

Cas des matériaux pour terrassement

Bien souvent, les matériaux pour les remblais ou pour les couches de forme sont issus du chantier même où ils sont utilisés dans le cadre des mouvements de terre (déblais – remblais). Dans certains cas, ils peuvent même être utilisés sans réel mouvement par traitement en place à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. On entend par traitement en place à la chaux, le répandage d'une couche de chaux (la plus fréquemment utilisée), suivi d'un mélange en place avec un engin de terrassement, le tout finalisé par un compactage. La chaux a pour effet de faire baisser la teneur en eau du matériau et de le rendre ainsi plus facile à travailler. Elle peut aussi améliorer dans le temps la portance du sol. Le traitement aux liants hydrauliques est plus particulièrement utilisé pour augmenter les performances du matériau ; il n'est pas spécifique aux terrassements.

Dans le cas de chantiers déficitaires en matériaux ou présentant des matériaux de qualité insuffisante, il est fait appel à des approvisionnements en provenance de carrières ou d'emprunts extérieurs.

Sauf dans le cas des traitements en place, les matériaux font l'objet au minimum d'une extraction (à la pelle, au scrapper ou à l'explosif), et parfois aussi d'une préparation mécanique (criblage avec ou sans concassage).

Cas des granulats

Sauf exception, les granulats sont issus d'installations classées : les carrières. La matière première y fait d'abord l'objet d'une extraction (à la pelle mécanique et / ou par abattage à l'explosif selon la roche), puis d'un traitement (au minimum criblage, au maximum une ou plusieurs étapes de concassage, criblage, lavage).

Dans le cas de carrières de roche massive, la roche saine d'un site d'extraction n'est accessible qu'après décapage de la couche végétale et de la roche altérée, dont l'épaisseur peut atteindre plusieurs mètres. La matière première y fait d'abord l'objet d'une extraction (à la pelle mécanique et/ou par abattage à l'explosif selon la roche, cf. figure 1), puis d'un traitement.



Figure 1 : Exemple d'extraction par abattage à l'explosif (Source : Cemex)

Il en résulte des blocs de roche de taille variable, de l'ordre du mètre pour leur plus grande dimension. Les matériaux sont chargés et transportés depuis l'abattage (le front de taille) jusqu'à l'installation de traitement d'une carrière, qui se compose de différents éléments correspondants aux différentes étapes de fabrication des granulats :

- concasseurs pour permettre la réduction des matériaux
- cribles pour trier les matériaux par classes granulaires
- trémies d'alimentation et de stockage
- bandes transporteuses (Figure 2) pour acheminer les granulats vers les concasseurs, les cribles et les trémies de stockage.

Le concassage des roches massives procède par étapes successives, allant de l'étage primaire (précédé d'un scalpage éventuel pour éliminer la fraction altérée des matériaux provenant du front de taille) au tertiaire (avec ou sans boucle de recyclage des plus gros éléments). Ces étapes sont entrecoupées de phases de criblage visant à trier les particules par classes granulaires, pour les stocker avant commercialisation ou pour n'acheminer que les plus grosses vers l'étage de concassage suivant. Parfois, un lavage des granulats est réalisé en fin de traitement.



Figure 2 : exemple de bandes transporteuses d'installation de traitement d'une carrière (Source : Cemex).

Certains des procédés de préparation des matériaux faisant l'objet des autres rubriques d'OFRIR se sont développés à partir des techniques existantes. Sont donc rappelés ci-après quelques éléments concernant leur exploitation.

La figure 3 présente un schéma de principe d'installation :

- Étape 1 : concassage primaire (concasseur à mâchoire sur le schéma)
- Étape 2 : concassage secondaire (concasseur giratoire sur le schéma)

Etape 3 : concassage tertiaire (concasseurs giratoires sur le schéma)

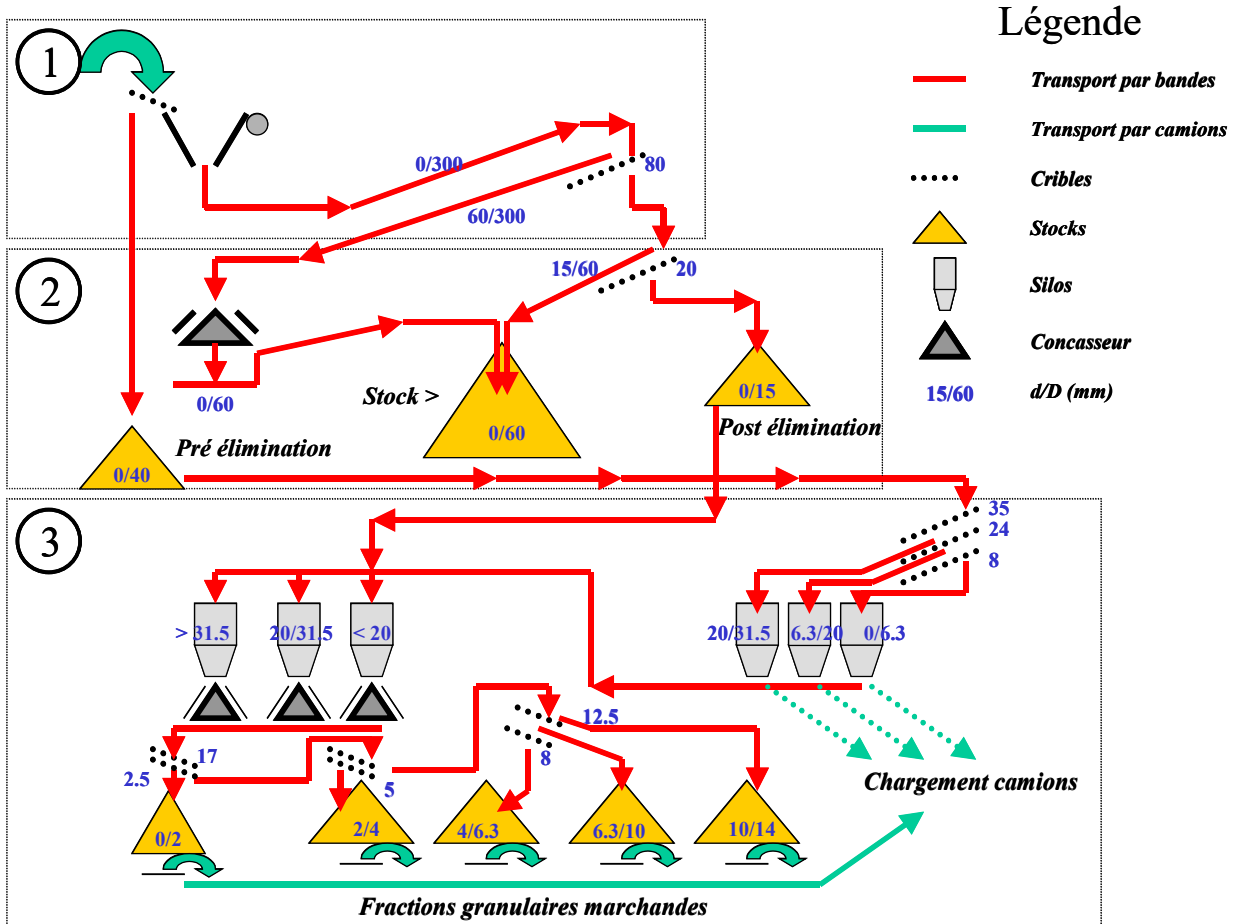


Figure 3: exemple d'installation et des étapes de fabrication des granulats.

Les granulats sont désignés par d/D où d désigne la plus grande ouverture de maille de tamis capable de retenir l'échantillon et D la plus petite ouverture de maille de tamis laissant passer l'échantillon ; l'intervalle $d-D$ s'appelle classe granulaire et la granularité désigne la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat.

Tableau 1 : Différentes classes granulaires de granulats.

	d (mm)	D (mm)
Filler	0	la plupart des grains passe au tamis de 0,063 mm et qui peut être ajouté aux matériaux de construction pour leur conférer certaines propriétés
Sable	0	$D \leq 4$ mm pour béton (NF EN 12620) et mortier (NF EN 13139)
		$D \leq 2$ mm pour mélange bitumineux (NF EN 13043)
		$D \leq 6.3$ mm pour matériaux traités et non traités (NF EN 13242)
<i>La définition des sables est en cours d'harmonisation entre les normes produits et c'est celle des granulats pour béton qui sera retenue dans les versions révisées à paraître ($d \leq 4$ mm).</i>		
Grave	0	$4 \leq D \leq 45$ mm pour béton (NF EN 12620)
		$2 < D \leq 45$ mm pour mélange bitumineux (NF EN 13043)
		$6,3 < D \leq 90$ mm pour matériaux traités et non traités (NF EN 13242)
<i>Les graves commenceront au-delà de 4 mm, conséquence de la note précédente.</i>		
Gravillon	$d \geq 2$ mm	$4 \leq D \leq 63$ mm pour béton (NF EN 12620)
	2 mm	$D = 4$ mm pour mortier (NF EN 13139)
	$d \geq 2$ mm	$2 < D \leq 45$ mm pour mélange bitumineux (NF EN 13043)
	$d \geq 1$ mm	$2 < D \leq 90$ mm pour matériaux traités et non traités (NF EN 13242)
Ballast	31.5 mm	50 ou 60 mm pour ballasts (NF EN 13450)

La teneur en fines d'un granulat est définie par le pourcentage de passant à 0,063 mm.

Une illustration des classes granulaires de granulats (cf. figure 4) est proposée.

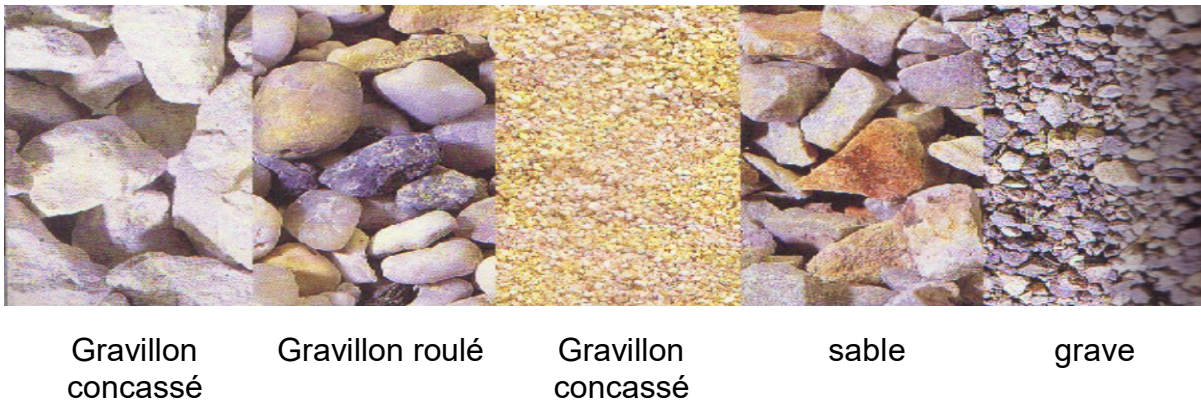


Figure 4 : classes granulaires de granulats (Source : Cemex)

4 Caractéristiques physico-chimiques

Les caractéristiques physico-chimiques des granulats et matériaux naturels sont liées à leurs caractéristique texturale et composition minéralogique. Ces caractéristiques ont une forte influence sur une partie des propriétés géotechniques des matériaux mais sont rarement évaluées directement par des mesures.

Une roche est constituée d'un assemblage de minéraux. Un minéral est composé d'éléments chimiques organisés selon un réseau cristallin fixe. Il est à noter que les argiles sont des minéraux à part entière.

4.1 Classification

Du point de vue de la chimie, les principales familles de roches sont :

- **les roches siliceuses -acides-** : l'index d'acidité correspond au rapport de la silice sur la somme des cations : Si/\square cations. Si l'index est supérieur à 60% alors la roche est dite acide ou saturée ou baptisée minéral siliceux. Si l'index est compris entre 50% et 60%, alors la roche ou le minéral est dit neutre.
Exemples : granite, rhyolite, quartzite, silex, gneiss...
- **les roches silicatées -basiques-** : se dit des roches magmatiques ou métamorphiques pour lesquelles l'index précédent est inférieur à 50%. Le quartz ne **crystallise pas**. **Ces roches sont** généralement sombres et denses. Bien que beaucoup plus rares que les précédentes à la surface des continents, elles représentent une source majeure pour la production de granulats.
Exemples : diorite, basalte, amphibolite...
- **les roches carbonatées** : il s'agit essentiellement des calcaires, roches constituées en majorité de cristaux de calcite (carbonate de calcium). Il est à noter que la présence de minéraux argileux mêlés aux cristaux de carbonates est fréquente. Si les proportions en sont importantes, la roche n'est plus un calcaire mais une marne.

Dans cette classification par familles chimiques, il est à signaler que de nombreux matériaux sédimentaires sont en fait des mélanges de grains de natures pétrographiques (donc chimiques) différentes.

C'est le cas des roches argileuses, qui contiennent souvent des carbonates. C'est aussi le cas des matériaux alluvionnaires, dont la composition pétrographique dépend de la nature des roches présentes dans le bassin versant du cours d'eau considéré ; ces alluvions sont d'ailleurs souvent qualifiés de « silico-calcaires ».

4.2 Effets physico-chimio-mécanique

Les constituants majeurs des roches que sont la silice, les silicates et les carbonates ont une influence sur le comportement des matériaux, rarement évaluée en tant que telle dans les identifications géotechniques. L'une des influences connues en pratique est une différence d'affinité des granulats vis à vis des liants produisant des différences de comportement (Duthoit V., 1990).

Dans le cas particulier de l'alcali-réaction, la méthode de qualification prévoit des identifications minéralogiques (selon la norme FD P18-542). Concernant les argiles, des essais indirects permettent d'en qualifier les effets. Pour la détermination de la présence d'argile, la norme est : NF EN 933-9: Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 9 : qualification des fines - Essai au bleu de méthylène.

Les roches peuvent naturellement contenir divers minéraux qui, même en faibles quantités, peuvent avoir des influences négatives sur le comportement, du fait de leurs caractéristiques physico-chimiques (Duthoit V., 1990). Par exemple, on ne tient pas à utiliser des argiles gonflantes dans les matériaux de chaussée car le gonflement ne permet pas de garantir l'intégrité de l'ouvrage.

Comme autre exemple, on citera les sulfures (notamment la pyrite FeS_2) dont l'oxydation peut engendrer la modification des conditions chimiques du milieu où ils se trouvent (pH), et dont les répercussions peuvent être des désordres géotechniques aux ouvrages du fait de gonflements dus à la création de nouvelles espèces minérales (de type sulfate). (Duthoit V., 1990). Pour les usages en chaussées béton, il existe d'ailleurs des spécifications sur le dosage maximum admissible pour ces matériaux réactifs. Pour la détermination des sulfates: NF EN 1744-1: Essais visant à déterminer les propriétés chimiques des granulats - Partie 1 : Analyse chimique

5 Caractéristiques géotechniques

Qu'il s'agisse de granulats ou de matériaux destinés aux terrassements, quelques décennies de savoir-faire se sont traduites par la constitution d'un référentiel solide. Dans celui-ci, les matériaux sont classés en fonction de leurs propriétés (normes NF P 11-300 et NF P 18-545), et les règles d'usages des différentes classes ainsi obtenues sont codifiées dans les documents d'application des normes (tels que le GTR), dans les normes de matériaux de chaussées et dans les guides d'application (textes de spécifications) les concernant.

Pour les matériaux destinés aux terrassements, la norme NF P 11-300 prévoit plusieurs niveaux d'identifications géotechniques. Les matériaux sont d'abord classés selon leur « nature ». Concrètement, les paramètres influents sont le diamètre maximal D_{max} , la granularité, l'activité des argiles pour les sols meubles, et la nature pétrographique pour les matériaux rocheux. Un second niveau de classement fait intervenir l'état hydrique du sol, c'est à dire sa teneur en eau naturelle comparée à son comportement à différentes teneurs en eau.

Pour certains matériaux, d'autres caractéristiques sont prises en compte, comme la résistance mécanique des grains ou la masse volumique.

Les méthodes de mesure de toutes ces différentes caractéristiques sont normalisées.

Pour les granulats, les propriétés géotechniques sont réparties en deux familles :

- les premières sont dites « intrinsèques ». Elles dépendent essentiellement de certaines propriétés physiques des roches. Il s'agit notamment des résistances mécaniques, de la masse volumique des grains, ...
- les secondes sont dites « de fabrication ». Il s'agit des paramètres sur lesquels le processus de fabrication dans l'installation de concassage-crible a une

influence majeure. Le principal d'entre eux est la granularité. On citera aussi la forme et la propreté ...

Les essais permettant de mesurer ces caractéristiques sont décrits dans des normes européennes. La liste de ces normes fait l'objet d'un paragraphe de la norme générale NF P 18-545 à laquelle le lecteur est invité à se reporter. Un paramètre important que la norme NF P 18-545 impose aux producteurs de granulats souhaitant l'appliquer est celui de la régularité des caractéristiques des produits qu'ils mettent sur le marché. A ces contraintes s'en ajoutent d'autres, d'ordre réglementaire, décrites dans les normes européennes produits et prenant notamment la forme de fréquences d'essais et de valeurs limites imposées, qui autorisent la mise sur le marché des granulats sanctionnée par l'apposition du marquage CE.

6 Caractéristiques environnementales

6.1 Effets sur les écosystèmes

Les milieux environnants directement concernés sont l'air, l'eau et le sol en premier lieu et ce qui leur cause un impact. On doit également tenir compte dans une démarche de caractérisation du mode de transport et de transfert des substances depuis la source des rejets vers la ou les cibles impactées. Enfin, le contexte particulier lié à une phase de chantier doit également être délimité pour répertorier les interactions possibles entre la réalisation de l'ouvrage et l'environnement.

Des travaux de l'office international de l'eau (Berland, 1998) font état de fines facilement entraînées dans les eaux de ruissellement, provoquant une augmentation importante de la turbidité, c'est à dire de la teneur en matières en suspension. Des éléments tels que le fer et le manganèse, contenus dans ces fines, se dissolvent aisément. En cas de contact avec l'oxygène de l'air, ils peuvent aussi précipiter sous forme d'oxydes, que l'on va ensuite retrouver, après adsorption, dans les sédiments des eaux de surface.

D'autre part, dans le cas d'une durée de stockage suffisamment longue, et dans des conditions humides, des algues peuvent se développer en utilisant le carbone atmosphérique, le phosphate et le nitrate contenus dans l'eau. Sous les algues mortes, des bactéries dénitrifiantes trouvent également un milieu propice à leur développement. De la même manière, des bactéries sulfato-réductrices peuvent contribuer à faire diminuer le taux de sulfates et de phosphates.

6.2 Acceptabilité environnementale

Il n'existe pas de ressources bibliographiques sur ce sujet.

Une étude de l'ADEME (1996), traite du comportement à la lixiviation de matériaux considérés comme inertes et de produits naturellement exposés à l'action de l'eau.

Pour ces derniers, qui concernent les matériaux relatifs à différentes sortes de roches présentant ou non à l'état naturel des teneurs non nulles en substances diverses, des essais de lixiviation ont été réalisés. Il s'agit bien de l'essai de lixiviation préconisé par la norme NF X31-210, qui permet d'évaluer le potentiel polluant d'un déchet qui a été broyé préalablement à sa mise au contact de l'eau (NB : en 1996, c'était l'essai de référence et l'essai NF EN 1744 actuel lui est ultérieur). Il en ressort que pour les différentes roches lixiviées, les fractions solubilisées sont de l'ordre de cent à mille fois plus faibles que les seuils d'admission des déchets ultimes stabilisés en installations de stockage des déchets dangereux (NB : seul référentiel disponible à l'époque).

La composition initiale des granulats et leur réactivité éventuelle pour des usages particuliers est liée au contexte géochimique entourant l'ouvrage. Selon les enjeux environnementaux (présence de milieux sensibles, vulnérables), l'usage de matériaux présentant des compositions physico-chimiques différentes de celle de la zone de réemploi peut avoir un impact, comme par exemple :

- dans des zones humides de type tourbière à pH acide, la mise en œuvre de matériaux pouvant modifier le pH peut être problématique ;
- la libération de certains éléments chimiques peut conduire à leur présence dans des cours d'eau.

6.3 Condition de fabrication et de mise en œuvre

Les granulats extraits des roches, à l'instar des sols, ne sont pas a priori nocifs pour l'environnement. Cependant, les étapes d'extraction, de criblage/concassage, de transport et de stockage modifient leurs interactions physico-chimiques avec l'air, l'eau et le sol, pouvant aboutir à des émissions plus ou moins significatives. Les conditions et la durée des stockages sont déterminantes dans le processus. On rappelle quelques éléments liés à l'exploitation des matériaux ordinaires : Les *ultra-fines* sont transportées par l'air, et parfois sur de longues distances, dans le cas de stockages ou transports en milieu sec et exposé aux vents. Cependant, les granulats sont généralement commercialisés sous forme de fractions granulaires, ce qui limite considérablement le phénomène potentiel d'envol de poussières. Plus précisément, les envois susceptibles de se produire concernent les sables et graves (par exemple 0/4, 0/20, ...), au moment du chargement sur le site de la carrière, phénomène atténué par la pluie. Les camions transportant des graves doivent bâcher leur benne pour éviter l'envol de fines

6.4 Suivi environnemental

Aucune bibliographie n'est disponible sur ce sujet.

7 Aspects sanitaires

On peut signaler que la fabrication des granulats, qui s'effectue dans les installations d'élaboration intégrées aux carrières (installations classées surveillées par les DREAL), génère des quantités importantes de poussières (souvent siliceuses) ; celles-ci sont

généralement confinées dans les installations, voire récupérées par filtration de l'air. La protection des travailleurs est assurée d'après la réglementation du travail.

Les eaux de lavage de carrière sont traitées voire recyclées dans l'installation de sorte que le pH de l'eau qui est rejetée dans le réseau superficiel ne soit pas préjudiciable au milieu (selon la réglementation et le dossier ICPE de l'installation considérée).

Les sols et roches naturels sont considérés généralement comme inertes, car soit exempts de substances dangereuses, soit contenant des substances dangereuses très peu solubilisables (Duthoit V., 1990). Lorsqu'ils sont incorporés dans des infrastructures routières, ils ne présentent donc pas de risques sanitaires consécutifs à une exposition par l'eau et le sol. C'est en particulier le cas pour les métaux.

Le stockage temporaire des granulats hors des carrières peut, par exemple avant l'emploi dans des centrales d'enrobage, être réalisé à l'abri, dans le but de maintenir une faible teneur en eau avant utilisation. Leur manutention à ce stade ne fait pas l'objet d'une protection particulière des travailleurs qui les manipulent.

8 Usages (Types d'infrastructures)

L'emploi des matériaux en terrassements et techniques routières est encadré par des normes, ainsi que par des documents d'application des normes qui font référence dans la communauté technique. L'objet de ce chapitre est de rappeler leur articulation, en citant ces documents.

8.1 Utilisation en remblais et couches de forme

Les matériaux utilisables en terrassement font l'objet d'une classification. Celle-ci est normalisée (NF P 11-300) et s'appuie sur les caractéristiques géotechniques des matériaux.

L'utilisation des diverses classes de matériaux ainsi délimitées est codifiée dans deux documents, qui sont respectivement le « Guide Technique pour la Réalisation des Remblais et des Couches de Forme » (connu sous l'abréviation GTR), et le « Guide Technique pour le Traitement des Sols à la Chaux et / ou aux Liants Hydrauliques » (connu sous l'abréviation GTS).

Pour chaque classe et sous-classe de matériaux, ces documents précisent les modalités d'extraction et de mise en œuvre. Ils précisent aussi les possibilités et les conditions de traitement (actions sur la granularité, sur la teneur en eau, ou amélioration par apport de chaux et/ou liants) visant à faciliter les opérations de mise en œuvre, et qui conduisent dans certains cas à améliorer les caractéristiques mécaniques des matériaux.

Il faut souligner que, pour des utilisations en remblais, pratiquement tous les types de sols et matériaux rocheux naturels sont utilisables sous une condition ou une autre. Les seules restrictions concernent leur état hydrique, à savoir qu'ils peuvent être considérés comme « inutilisables en l'état » s'ils sont trop secs ou trop humides. En revanche, dans

le cas des couches de forme, aux restrictions liées aux états hydriques s'ajoute l'exclusion de certaines natures de matériaux, en particulier les « A₄ », « C_xA₄ » (matériaux excessivement argileux), ainsi que certains matériaux rocheux.

A noter que le GTR a succédé à un document antérieur, connu sous le nom de Recommandation pour les Terrassements Routiers (RTR), qui a été en vigueur de 1976 à 1992.

8.2 Utilisation en couches de chaussées

De même que pour les matériaux pour terrassements, les granulats pour couches de chaussées font l'objet d'une classification décrite dans les normes européennes NF EN 12620, 13043 et 13242. Celle-ci est reprise dans une norme nationale unique (NF P 18-545) qui préconise des catégories selon l'usage prévu du granulat et selon ses caractéristiques géotechniques.

Ainsi, la norme NF P 18-545 prévoit une classification pour les granulats destinés notamment aux assises de chaussées (chapitre 7 de la norme), une autre s'ils sont destinés à des couches de roulement bitumineuses (chapitre 8), et une autre encore pour les utilisations en chaussées béton (chapitre 9).

Jusqu'au remplacement des normes nationales par les normes européennes en juin 2004, l'utilisation des diverses classes de matériaux ainsi délimitées était codifiée pour le réseau routier national dans les documents d'application suivants (documents regroupés sous SETRA, 1999) :

- le guide « Assises de chaussées », dans lequel les tableaux 4, 6 et 7 donnent les spécifications en fonction des trafics routiers visés, pour des utilisations en techniques non traitées (GNT) ou traitées aux liants hydrauliques (GTLH, STLH) ;
- le guide « Enrobés hydrocarbonés à chaud », dans lequel les tableaux 5, 6 et 7 donnent les spécifications en fonction des trafics routiers visés, pour des utilisations selon les différentes techniques bitumineuses pour couches de roulement ou d'assises ;
- le guide technique « Chaussées en béton », dont la section 4.1.1 précise les conditions de choix des granulats pour les techniques concernées ;
- le guide technique « Enduits superficiels d'usure », dont la section 1.A. précise les conditions de choix des granulats pour les techniques concernées. Il est à noter que la section 2.B de ce document donne des indications sur la façon d'apprécier l'adhésivité liants - granulats.

Cet ensemble de document a été complété en 2005 par la note n°10 du SETRA qui rétablit la cohérence entre les guides et les nouveaux codes définis dans la norme NF P 18-545.

Il faut aussi remarquer que, pour leurs parties relatives aux granulats, ces documents remplacent une Directive antérieure de la Direction des Routes, qui était en vigueur depuis 1984, intitulée « Spécifications relatives aux granulats pour chaussées ».

Si les documents cités ci-dessus sont de loin les références les plus utilisées par les divers maîtres d'œuvre et d'ouvrages pour fixer les spécifications des marchés, rien n'empêche ces derniers de fixer d'autres spécifications. Ainsi, Scétauroute (aujourd'hui

EGIS Routes) a fixé ses propres références dans son « Manuel de conception des chaussées d'autoroute » (Caroff et al., 1994). Il faut aussi mentionner un certain nombre de « guides pour l'utilisation des matériaux locaux » édités par quelques régions (les guides sont listés au chapitre 2) dans lesquels des spécifications particulières à une ressource bien connue et identifiée sont proposées, et peuvent donc servir de référence aux maîtres d'ouvrage qui le souhaitent.

8.3 - Choix des granulats pour couches de roulement

8.3.1. Granulats et offre d'adhérence des chaussées

L'offre d'adhérence d'une chaussée résulte en grande partie des deux paramètres que sont la formule du matériau de revêtement et les granulats qui le constituent.

A titre d'illustration, l'approche anglaise par exemple a longtemps privilégié l'effet du granulat (Roe, 1999). En effet, la tradition des enrobés cloutés y est très ancrée. Il s'agit de matériaux fins dans lesquels sont enchâssés de gros gravillons. Cette configuration conduit à un faible nombre de points de contacts pneu-chaussée et donc à une sollicitation très forte des gravillons. Elle nécessite de très fortes exigences sur la résistance au polissage des gravillons, qui est considérée comme le paramètre primordial, voire quasi exclusif pour l'obtention d'une adhérence bonne et durable (Roe and Hartshorne, 1998). De ce fait, il y a été développé toute une gamme de spécifications en fonction de la classe de trafic et des conditions de sites. Ces spécifications atteignent très rapidement des seuils de PSV = 60 et peuvent même monter à des valeurs de PSV = 70.

A l'opposé, les techniques de revêtements routiers développées en France ces trente dernières années offrent un intéressant compromis. L'usage de fractions granulaires de plus petite taille n'est pas incompatible avec l'obtention d'une bonne macrotexture de la chaussée, certes sous réserve d'opérer un choix convenable de la formule routière et une bonne mise en œuvre, de sorte que l'évacuation de la lame d'eau est assurée. En résulte la multiplication des points de contact pneu-chaussée qui devient alors un paramètre clé de l'adhérence et le niveau d'exigence sur les granulats peut être abaissé.

Concernant ces exigences, il est toutefois utile de préciser que la politique française en matière de choix des granulats pour les couches de roulement a longtemps été d'accorder une place prépondérante à la résistance à la fragmentation mesurée selon l'essai Los Angeles (LA, norme NF EN 1097-2) et à l'attrition mesurée selon l'essai Micro-Deval (MDE, norme NF EN 1097-2). Cette position s'appuyait sur l'idée que ces deux caractéristiques permettent le maintien, malgré l'effet du trafic, d'arêtes vives propices aux propriétés antidérapantes du revêtement (Dupont and Tourenq, 1993). Elle se justifiait d'autant plus sur des revêtements de type enduit superficiel, dans lesquels la position des granulats est relativement aléatoire. Elle se traduisait dans les spécifications par l'introduction d'une compensation entre les caractéristiques mécaniques (norme XP P 18-540, 1997), ouvrant ainsi pour la plupart des usages la possibilité de choisir des granulats de PSV assez faible, pourvu que cette faiblesse soit compensée par d'excellents coefficients LA et MDE.

Ces dernières années, quelques déboires sont survenus avec des granulats respectant cette spécification, notamment ceux issus de roches basaltiques ou apparentées. De plus, dans la plupart des techniques de bétons bitumineux qui dominent actuellement sur les chaussées à forts trafics, les granulats sont généralement disposés à plat et présentent une surface plane aux pneus, et beaucoup moins leurs arêtes. Enfin, les résultats des planches expérimentales ont permis d'établir que les résistances à la fragmentation et à l'usure n'ont pas d'action vis à vis de la pérennité des propriétés antidérapantes d'une couche de roulement. Ces éléments ont donc montré que la compensation ne se justifiait pas ; les nouvelles classifications (norme NF EN 13043) ne la reprennent donc pas.

8.3.2. Ressources en granulats pour couches de roulement.

Une ressource en granulats peut se définir comme un gisement de matériaux dont les qualités géotechniques permettent de répondre aux spécifications des marchés et dont l'exploitation est économiquement viable et peut être autorisée par décision administrative.

Nature des granulats

Les spécifications des marchés français ayant jusqu'à présent privilégié les fortes valeurs de coefficients Los Angeles et Micro-Deval, au détriment de résistances au polissage élevées, il n'est pas surprenant de constater que les coefficients PSV habituellement recensés parmi les carrières françaises actuelles (voir Fig. 5) soient peu élevées au regard de ceux disponibles auprès des carrières de pays voisins. On précise que de bons LA et MDE entraînent de moins bons PSV, ces caractéristiques variant inversement l'un des autres car un bon PSV suppose un contraste de dureté entre minéraux, donc des minéraux plus tendres qui vont relever les valeurs de LA et MDE.

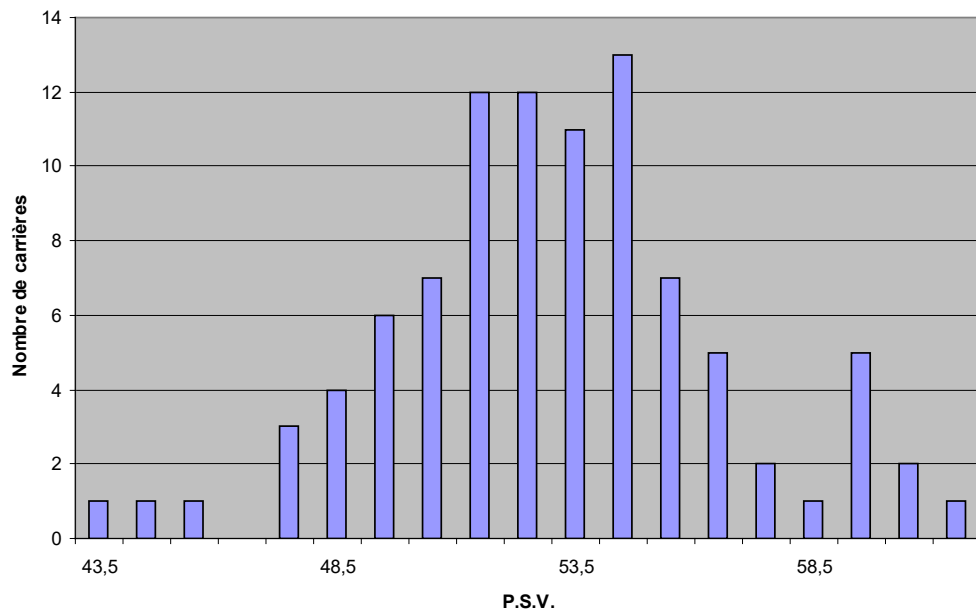


Figure 5 : Distribution des valeurs moyennes de PSV provenant d'une centaine de carrières françaises fournissant pour couches de roulement (d'après données de Matériaux de Construction et Produits de Carrières, n° 715, 2001)

La géologie extrêmement diverse du sous-sol français offre sans doute la possibilité de trouver des roches avec des coefficients PSV plus élevés que ceux actuellement proposés sur le marché (tout en gardant de bonnes performances sur les autres caractéristiques mécaniques). Si de telles roches venaient à être localisées, il s'agirait d'en préserver l'accès pour une éventuelle exploitation future en s'appuyant sur les schémas départementaux des carrières (Lédée and Pasquet, 2004).

Cependant, la lourdeur des procédures pour l'ouverture de carrières et l'ampleur des investissements nécessaires sont considérables, conférant beaucoup d'inertie au tissu industriel de la production des granulats. Ainsi, un développement important de l'exploitation de ce type de matériaux ne semble pas d'actualité. De toute façon, avec une trentaine de carrières offrant des PSV > 55, les ressources actuellement exploitées permettent d'ores et déjà une diversification des approvisionnements.

Equilibre des productions

Les granulats pour couches de roulement sont issus du concassage de roches. Un processus de réduction granulométrique, quels que soit le type de concasseur utilisé et les réglages adoptés, conduit à une courbe granulométrique étalée (Duthoit, 1990). L'utilisation préférentielle de l'une ou l'autre des fractions ainsi produites conduit inévitablement à la constitution de stocks excédentaires dans les autres fractions. Une carrière positionnée dans un secteur géographique déficitaire en ressources trouvera toujours le moyen de valoriser ces stocks. A l'inverse, cela n'est généralement pas possible pour un site de production situé en zone excédentaire, comme c'est souvent le cas des carrières susceptibles de fournir les granulats pour couches de roulement. De plus, les exigences sur la qualité des granulats (notamment pour les paramètres de forme et de régularité) conduisent généralement les producteurs à faire subir aux

matériaux plusieurs cycles de concassage. Chacun de ces cycles produit des fractions sableuses, qui représentent donc le plus souvent l'excédent le plus important.

La demande accrue en formules discontinues ces dernières années a conduit à la constitution d'importants stocks excédentaires de petits gravillons (voir Fig.6). Si cette discontinuité reste indispensable pour certaines formules (Béton Bitumineux Drainant notamment), les données d'adhérence acquises sur quelques chantiers de Béton Bitumineux Très Mince 0/10 continus ou à discontinuité réduite conduisent à s'interroger sur sa véritable nécessité pour d'autres formules (au moins dans des conditions de site faciles soit pas trop accidentogènes). Si cette tendance venait à être confirmée, une modification des habitudes de formulation conduirait à un meilleur équilibre des productions, sans toutefois permettre de réduire les excédents sableux qui représentent les plus forts tonnages.

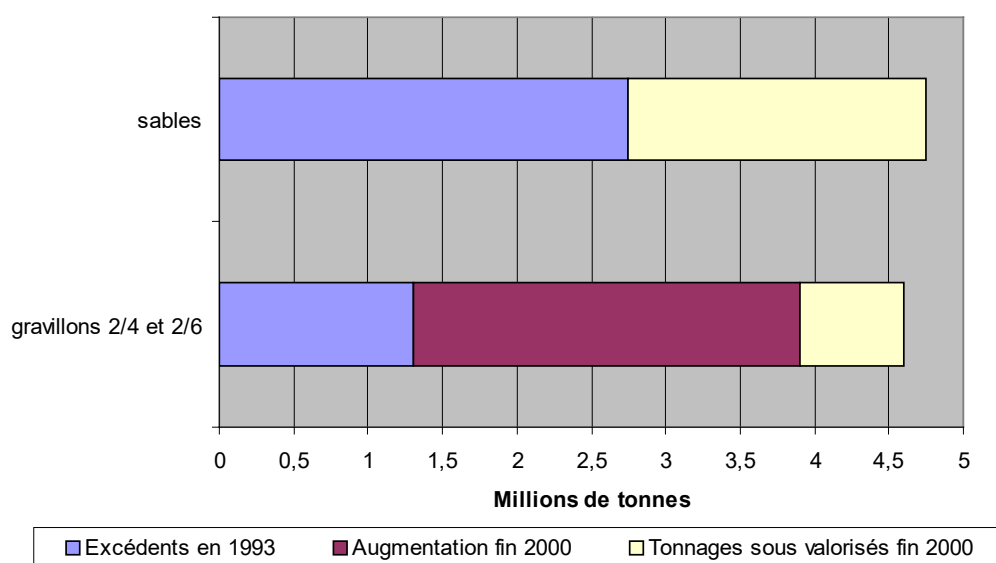


Figure 6 : Tonnages des fractions excédentaires dans les carrières de roches massives fournissant des granulats pour couches de roulement (in Matériaux de Construction et Produits de Carrières, n° 715, 2001).

8.3.3. Améliorer l'offre d'adhérence de certaines chaussées

Pour conférer à une chaussée un niveau d'adhérence voulu et assurer le maintien de cette performance dans le temps, il est possible de jouer sur la complémentarité entre formules routières et nature des granulats. Il apparaît que les besoins courants sont satisfaits par les techniques et spécifications actuelles (Ferrandez, 1993). Des formules de revêtements largement utilisées comme les BBTM ou les BBDr présentent sur ce point de très bonnes performances. Pour les granulats, les spécifications se limitaient à des coefficients PSV de 46,5 (si excellents coefficients LA et MDE) ou plus souvent 51,5 (ancien Coefficient de Polissage Accéléré = 0,50). C'est le cas par exemple des gravillons pour couches de roulement en BBSG ou BBTM (sous des trafics supérieurs à 150 Poids Lourds par Jour) du Réseau Routier National (LCPC, SETRA, 1994). Cependant, le besoin de revêtements à plus forte adhérence se fait sentir dans un nombre croissant de sites particuliers et, dans ces cas là, les seules solutions disponibles sont bien souvent des produits d'entreprises, très coûteux, à base de

granulats artificiels de bauxite calcinée liés à la résine époxy (Montagnon, 2000 ; Marmier, 2003 ; Marquet and Spillemaeker, 2004). Des solutions intermédiaires sont tout à fait envisageables mais ne sont aujourd'hui pas codifiées, ce qui freine leur emploi.

Pour répondre d'une façon adaptée aux diverses configurations accidentogènes, un recensement et une étude de ces configurations seraient aujourd'hui nécessaires. La large gamme des spécifications britanniques a été établie sur la base de l'observation et de l'étude statistique d'un grand nombre de tronçons de chaussées présentant des conditions de sites différentes (Roe and Hartshorne, 1998 ; Roe, 1999).

En France, il serait utile d'offrir aux maîtres d'ouvrages une palette élargie de solutions basées sur des spécifications plus détaillées tenant compte des formules de revêtement, du calibre et des performances des granulats. Cela nécessiterait qu'un travail important d'identification des zones à risque sur le réseau routier et d'étude de leur fonctionnement soit entrepris.

8.3.4. Synthèse

Le niveau d'adhérence des chaussées françaises est jugé dans l'ensemble satisfaisant ; les combinaisons entre les types de revêtements et les spécifications de coefficient PSV des granulats peuvent être considérées comme bien adaptées pour l'essentiel du réseau routier. Par exemple, pour des tracés interurbains linéaires en BBSG ou BBTM, la catégorie PSV₅₀ semble un bon choix. De plus, elle permet un approvisionnement relativement aisé compte tenu du tissu industriel des carrières en place. L'optimisation du niveau d'adhérence sur de telles chaussées se fait alors au travers de la courbe granulométrique et des formules de matériaux.

Par contre, la sensibilité au thème de la sécurité routière étant devenue très importante, des besoins supérieurs en adhérence apparaissent progressivement sur des itinéraires ou sections particuliers. Or aujourd'hui, la plupart des cas particuliers traités le sont à l'aide des techniques à base de bauxite calcinée. Le coût très élevé de ces techniques oblige à en limiter l'usage aux cas extrêmes, les « points noirs », pour lesquels d'importants moyens financiers peuvent être engagés. Pour une partie des situations intermédiaires, des solutions techniques sont disponibles, mais restent méconnues.

Ces solutions peuvent s'appuyer, pour les sites concernés, sur l'optimisation entre le choix des formules d'enrobés et un niveau de spécification sur la résistance au polissage des granulats plus exigeant que l'actuel. Les ressources exploitées en France permettraient de répondre au moins partiellement à un tel cas de figure.

La codification souhaitable de cette optimisation nécessite toutefois un important travail d'étude des itinéraires afin d'aider à l'identification des tronçons concernés et de cerner leur demande réelle en adhérence.

Au-delà de cette préoccupation, un autre axe de progrès concerne les méthodes d'étude et d'essais en laboratoire. D'une part, il apparaît indispensable d'améliorer la fidélité des essais de polissage des granulats. Le développement de méthodes optiques de caractérisation des surfaces polies pourrait contribuer à atteindre cet objectif. D'autre part, l'adaptation des appareils de polissage dans le but de tester, non plus seulement

des granulats seuls mais directement des formules d'enrobés, représenterait un pas important vers la prévision des niveaux d'adhérence dès l'étude de formulation.

8.4 Optimisation du ballast - Recyclage

La dégradation de la géométrie de la voie et de ses constituants nécessite à la fois des opérations de maintenance préventive nombreuses et des opérations curatives lourdes à mettre en place. La réutilisation du ballast usagé constitue donc un enjeu économique et environnemental important, qui nécessite de disposer d'un dispositif de tri pour éliminer les particules non réutilisables.

Le ballast est un ensemble de granulats constituant un élément support de la voie de chemin de fer. Les granulats proviennent du concassage de roches extraites dans des carrières de pierres dures (granit, diorite, rhyolite, quartzite, grès).

Le ballast remplit les fonctions suivantes :

- la transmission et la répartition des efforts à la plate-forme dues aux charges statiques et dynamiques des circulations, l'absorption des vibrations mécaniques et acoustiques, l'ancrage latéral et longitudinal de la voie, la résistance au cisaillement permet de contenir les chargements latéraux (circulation en courbe, flambage consécutif de la dilatation des Longs rails soudés) et longitudinaux (accélération, freinage), le drainage des eaux pluviales.

L'ensemble des fonctions remplies par le ballast nécessite de définir des critères de qualité, qui sont proposés dans la norme européenne NF EN 13450. Le ballast doit répondre essentiellement aux critères suivants :

- une granulométrie (31.5-50 mm ou 31,5-63 mm) et une propreté permettant d'assurer le drainage,
- une angularité assurant la résistance au cisaillement, celle-ci peut être vérifiée par le vidéogranulomètre VDG 40.2 (matériel MLPC)
- une résistance au choc et à l'usure par abrasion assurant le maintien de l'angularité et de la granularité, respectivement mesurées par les essais Los Angeles et Micro-Deval en présence d'eau
- une insensibilité à l'eau et au gel,
- une homogénéité de la forme des grains, absence de formes de grains trop allongées ou aplaties.

La circulation des trains entraîne l'apparition de défaut de voies résultant de problèmes de nivellement. Ceux-ci sont identifiés à l'aide d'une rame spéciale appelée voiture Mauzin. Les défauts de voie liés au ballast sont d'abord corrigés par le bourrage qui consiste à vibrer et serrer les granulats situés sous les traverses. Si celui-ci ne suffit pas, il faut effectuer un renouvellement complet du ballast.

Il est apparu que les lignes à grande vitesse nécessitaient une maintenance bien plus importante que les lignes classiques. La réutilisation du ballast usagé constitue donc un enjeu économique et environnemental important, qui nécessite de disposer d'un dispositif de tri pour éliminer les particules non réutilisables.

9 Références bibliographique

9.1 Publications

ADEME, 1996. « Comportement à la lixiviation de matériaux considérés comme inertes et de produits naturellement exposés à l'action de l'eau. » ADEME (Ed), Angers, France, 24 p.

Arquié G, Tourenq C., 1990. « Granulats. » Presse de l'école nationale des Ponts et Chaussées (Ed), Paris, France, 717 p.

Berland J.M., 1998. « Impact sur l'environnement de l'extraction des granulats. » Synthèses rapides de l'Office International de l'Eau (Ed), recueil AE-31, 17 p.

Dupont P., Tourenq C., 1993 : Granulats et microrugosité. Bull. Labo. P. et Ch., n° 185, mai – juin, pp 145-151.

Duthoit V., 1990 : Concassage et broyage. In « Granulats », Presses de l'ENPC, 717p

Ferrandez F., 1993 : Analyse des accidents : infrastructure et sécurité. Bull liaison Labo. P. et Ch., n°185, pp. 19-26.

Lédée V., Pasquet J.F., 2004 : Proposition de méthode pour la révision du chapitre « ressources » des schémas départementaux des carrières. Techniques et Méthodes Labo. des P. et Ch.

Marmier F., 2003 : Colgrip, antidérapage garanti. Revue Générale des Routes et Autoroutes, n° 814, pp84-85.

Marquet T., Spillemaeker P.M., 2004 : Enduits à hautes performances dans le département de l'Allier. Revue Générale des Routes et Autoroutes, n° 830, pp83-86.

Matériaux de Construction et Produits de Carrières, n° 715, 2001 : La demande et l'offre en granulats pour couches de roulement, pp. 15-18.

Montagnon M., 2000 : Enrobés et enduits à base de bauxite en Ile de France. Route Actualité, n°99.

Roe P.G., 1999: Research on road surface skidding resistance in the U.K. Proceedings of the 2nd European Road Research Conference. European Commission - DGVII, Brussels, 7-9 June.

Roe P.G., Hartshorne S.A., 1998 : The polished stone value of aggregates and in-service skidding resistance. TRL Report, 322, 28p.

9.2 Documents techniques

Caroff G., Layerle E., Le Caignec H., Spagnol A., 1994. « Manuel de conception des chaussées d'autoroute. » SCETAUROUTE (Ed), 3^{ème} édition, France, 113 p.

LREP, UNICEM Ile-de-France, 1996. « Guide technique pour l'utilisation des matériaux régionaux d'Ile-de-France – Les calcaires. » Studio IAURIF (Ed), Paris, France, 40 p.

Maillot R., 2001. « Mémento technique des granulats. » Les Presses de l'École des Mines de Paris (Ed), Paris, France, 166 p.

10 Auteurs et relecteurs

Auteurs OFRIR1	Agnès Jullien (LCPC)
Relecture d'experts OFRIR1	Jean-Claude Auriol (LCPC), Yves Brosseau (LCPC), François de Larrard (LCPC), Jérémie Domas (INERIS), Guillaume Gay (INERIS), Vincent Lédée (LCPC), Patrice Piantone (BRGM)
Relecture comité de pilotage	Laurent Château (ADEME), Pierre Dupont (SETRA), Frédéric Leray (Ministère de l'environnement), Jacques Vecoven (UNPG/HOLCIM)
Auteurs OFRIR2	Martine Trauchessec (CETE Lyon), Christophe Ropert (IFSTTAR)
Relecture d'experts OFRIR2	Céline Chouteau (CETE Nord-Picardie), Guillaume Gay (INERIS), Minh Tan Do (IFSTTAR), Yannick Descantes (IFSTTAR)
Relecture bureau	Laurent Château (ADEME), Guillaume Gay (INERIS)
Date de mise en ligne, version finale	26 juin 2013