

# Granulats. Production et utilisations

par Pierre DUPONT

*Ingénieur CNAM*

*Expert responsable du domaine des granulats au SETRA (Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes)*

Georges AUSSEDAT

*Responsable des affaires techniques à l'Union Nationale des Producteurs de Granulats*

Yannick DESCANTES

*Docteur en Génie Civil. Ingénieur des Travaux Publics de l'État*

*Responsable de l'activité essais de granulats au Laboratoire central des Ponts et Chaussées*

et Jeanne-Sylvine GUEDON

*Docteur en pétrographie-volcanologie. Ingénieur des Travaux Publics de l'État*

*Chef de la section Géologie, Mécanique des Roches et Géotechnique de l'Environnement au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*

1.	Production des granulats .....	C 903v2 - 2
1.1	Extraction et transport vers les unités de traitement .....	— 2
1.1.1	Gisements de roches massives .....	— 2
1.1.2	Gisements de roches meubles .....	— 3
1.1.3	Mâchefers d'incinération d'ordures ménagères .....	— 4
1.1.4	Matériaux de démolition .....	— 4
1.1.5	Agrégats d'enrobés .....	— 4
1.2	Traitement proprement dit .....	— 4
1.2.1	Concassage .....	— 4
1.2.2	Criblage .....	— 6
1.2.3	Lavage .....	— 6
1.3	Cas particuliers .....	— 6
1.3.1	Mâchefers d'incinération d'ordures ménagères .....	— 6
1.3.2	Matériaux de démolition .....	— 7
1.3.3	Agrégats d'enrobés .....	— 7
2.	Protection de l'environnement .....	— 7
3.	Maîtrise de la qualité .....	— 7
4.	Spécifications d'usage .....	— 8
4.1	Domaine des chaussées .....	— 8
4.1.1	Assises .....	— 8
4.1.2	Revêtements .....	— 9
4.2	Domaine des bétons .....	— 9
5.	Marché des granulats en France .....	— 10
5.1	Production .....	— 10
5.2	Consommation .....	— 10
5.3	Transport .....	— 10
6.	Conclusion .....	— 11
	Pour en savoir plus .....	Doc. C 903v2

**D**ans un premier dossier [C 902v2], nous avons traité des principales ressources en granulats, des propriétés des roches exploitées et des principales caractéristiques géotechniques des granulats avec les essais correspondants. Dans ce dossier [C 903v2], nous traitons spécifiquement de la production et des spécifications d'usage des ouvrages réalisés.

Les normes, ouvrages à consulter et les principaux fournisseurs sont regroupés en [Doc. C 903v2].

# 1. Production des granulats

Les granulats naturels sont produits dans des carrières (figures 1 et 2), et chacune d'elles occasionne une occupation temporaire du sol, c'est-à-dire une parenthèse dans l'histoire du site.

**Rappel de définitions**

Les **granulats** sont des matériaux granulaires de dimensions n'excédant pas 125 mm, auxquels s'ajoutent les **enrochements** de dimensions supérieures à 125 mm mais de masses inférieures ou égales à 15 tonnes. Ils sont désignés par leur plus petite et plus grande dimensions  $d$  et  $D$ , l'intervalle  $d/D$  étant appelé **classe granulaire**. Cette désignation admet que des éléments puissent être retenus sur un tamis à mailles carrées d'ouverture  $D$  (tamis  $D$ ) et que d'autres puissent passer au travers du tamis  $d$ , dans les limites normalisées permises.

Trois grandes familles de granulats sont ainsi définies :

- les **sables**, où  $d = 0$  et  $2 \leq D \leq 6,3$  mm ;
- les **gravillons**, où  $d \geq 1$  mm et  $2 \leq D \leq 90$  mm ;
- les **graves**, où  $d = 0$  et  $2 \leq D \leq 90$  mm .

Les **fines** constituent leur fraction granulaire au travers du tamis de 0,063 mm.

Les granulats les plus couramment utilisés dans le bâtiment et le génie civil ont une masse volumique réelle comprise entre 2 et 3 Mg/m<sup>3</sup>.

Avant toute ouverture de carrière, l'accès au gisement représente une tâche administrative et environnementale de grande ampleur qui peut facilement durer 5 à 10 ans.

La période de production proprement dite est généralement plus longue dans les roches massives que dans les roches meubles (cf. [C 9 02v2]).

Enfin, lorsque le gisement est épuisé, ou au fur et à mesure de son exploitation, le site fait l'objet d'une remise en état conforme au projet et au plan de financement établis selon la législation en vigueur, laquelle est extrêmement contraignante en matière de protection de l'environnement.

L'implantation d'une unité nouvelle, ou la transformation d'une unité existante, nécessite la réalisation d'études préalables visant notamment à :

- caractériser le gisement sur les plans géologique et géotechnique ;
- estimer le marché potentiel en termes quantitatif et qualitatif ;
- définir les moyens techniques qu'il convient de mettre en œuvre dans le cadre d'une démarche industrielle ;
- rechercher la rentabilité financière du projet.

La connaissance des conditions de gisement et la maîtrise des outils de production, optimisée grâce au développement de la mécanisation et à l'avènement de l'automatisation, concourent à accroître la productivité des exploitations et à obtenir la régularité recherchée des granulats.

La production de granulats artificiels ou recyclés (cf. [C 9 02v2]), quant à elle, a le mérite de ne pas consommer de ressources naturelles et de ne pas modifier la topographie des terrains d'accueil des installations.

De manière générale, l'élaboration des granulats comprend deux opérations principales distinctes : l'extraction et le transport vers les unités de traitement d'une part, le traitement proprement dit d'autre part.



Figure 1 – Carrière de roche massive (photothèque CEMEX, 4 vents photographie)



Figure 2 – Exploitation en site alluvionnaire (photothèque CEMEX)

## 1.1 Extraction et transport vers les unités de traitement

### 1.1.1 Gisements de roches massives

L'extraction peut être exécutée soit sur un seul front par tranches horizontales successives (figure 3), soit sur plusieurs fronts par tranches horizontales simultanées. La première méthode est la plus fréquemment appliquée, la seconde étant plus particulièrement réservée aux gisements de moyenne puissance mais de faible épaisseur en regard de leur superficie. Selon la topographie du site, l'extraction progresse à flanc de coteau ou en fosses emboîtées.



Figure 3 – Extraction dans un gisement de roche massive (photothèque CEMEX)

■ La **découverte** consiste à mettre à nu la partie saine de la roche à exploiter. La terre végétale est d'abord décapée au boteur ou au scrapeur puis disposée en cordons à la périphérie du gisement ou transportée sur une aire de dépôt, pour être éventuellement réutilisée plus tard au moment du réaménagement du site.

Les matériaux stériles et les parties altérées du gisement sont également mis en dépôt (ou éventuellement réutilisés comme matériaux de remblai). Cette opération, parfois précédée d'un pré-minage, est réalisée au boteur voire à la pelle hydraulique avec chargement sur tombereau rigide lorsque le dépôt est éloigné.

La découverte peut ainsi représenter jusqu'à 20 % du terrassement total. Séquence essentielle pour la régularité de la production, la découverte doit être incluse dans le système qualité de la carrière bien qu'elle soit souvent sous-traitée.

La partie saine du gisement étant naturellement fracturée, le géologue peut en dresser une carte à deux dimensions en observant le front de taille, et, à l'aide de logiciels disponibles sur le marché, en avoir une idée à trois dimensions.

■ L'**abattage** a pour but de réduire la roche saine en place en blocs de tailles compatibles avec les possibilités des engins de chargement et de transport d'une part, et avec le gabarit du concasseur primaire d'autre part.

L'abattage est réalisé par un tir à l'explosif disposé dans des trous forés, alignés sur plusieurs plans parallèles au front de taille, qui peut être incliné jusqu'à 20° par rapport à la verticale. La détonation de l'explosif transmet au massif rocheux une puissante onde de choc, qui broie la roche dans son voisinage immédiat, initie une fracturation radiale au-delà et engendre une fracturation parallèle à toute surface libre sur laquelle elle se réfléchit. Elle produit également un gaz à haute température et haute pression, qui prolonge les fractures radiales et éjecte les blocs fracturés. La hauteur du front de taille est limitée par la réglementation française à 15 m, pour prévenir les risques de déviation de forage. La largeur de la tranche à abattre, appelée banquette, est en général de 3 à 6 m. La maille de foration est la surface comprise entre 4 trous d'abattage. Elle est généralement comprise entre 10 et 20 m<sup>2</sup> (la maille courante étant de 3 m x 4 m), suivant la blocométrie désirée.

La **foration des trous** associe un mouvement de descente, par percussion d'un marteau muni d'un outil taillant, à un mouvement de rotation. Les outils taillants peuvent forer entre quelques dizaines et plusieurs centaines de mètres, suivant la dureté et l'abrasivité de la roche : un quartzite est très abrasif, un calcaire l'est peu.

Les **explosifs** utilisés pour les tirs peuvent être soit en cartouche (dynamites ou émulsions), soit en vrac (pulvérulents, ou éventuel-

lement fabriqués sur place dans des unités mobiles à partir de nitrate et de fuel, et plus ou moins chargés de poudre d'aluminium lorsque les trous sont remplis d'eau). Cette seconde solution a l'avantage d'éviter au carrier les contraintes liées à la sécurité et à la sûreté (prévention du vol) du transport et du stockage des explosifs. Les quantités utilisées (50 à 150 g/t de matériau abattu) dépendent des caractéristiques du gisement et sont déterminées par la maille de foration et le diamètre des trous.

Des microretards à l'amorçage, entre les plans de forage, permettent d'optimiser la répartition de la taille des blocs abattus et surtout de diminuer fortement l'amplitude des vibrations du sol qui se propagent vers l'intérieur comme vers l'extérieur de la carrière, en étalant les détonations dans le temps.

Une fragmentation secondaire est quelquefois nécessaire sur les blocs trop gros pour la suite des opérations. Elle est réalisée le plus souvent à l'aide d'un marteau brise roche hydraulique (BRH), ou, lorsque cela est permis, par pétardage en introduisant des cartouches d'explosif dans des trous préalablement forés.

■ Après chaque tir, les matériaux abattus sont exploités en butte par un engin de chargement évoluant à leur pied. Lorsque les distances de transport sont inférieures à 150 m, il est possible d'utiliser une chargeuse sur pneumatiques assurant les fonctions chargement et transport vers le concasseur primaire. Pour des distances plus grandes, le transport est effectué par des tombereaux rigides ou dumpers de 35 à 50 t de charge utile ou par des tombereaux articulés lorsque les conditions de roulage sont difficiles.

### 1.1.2 Gisements de roches meubles

Les gisements de roches meubles reposent sur un mur de substratum non exploitable et sont limités par un toit surmonté d'une découverte. Entre le mur et le toit, se situe le gisement proprement dit, dont l'épaisseur est appelée puissance.

Trois cas peuvent se présenter suivant les niveaux respectifs du mur, du toit et de la nappe d'eau qui baigne fréquemment une partie des gisements :

- si le niveau de la nappe est inférieur à celui du mur, le site est hors d'eau et le gisement est exploité à sec ;
- si le niveau de la nappe est supérieur à celui du toit, le site est immergé et le gisement est exploité sous eau ;
- si le niveau de la nappe est compris entre ceux du mur et du toit, le site est semi-immérgé et le gisement est généralement exploité en deux phases distinctes.

■ La **découverte** est gérée comme pour les roches massives quand le site est hors d'eau. Lorsqu'il est immergé, on peut procéder à un rabattement de la nappe par pompage, si la perméabilité du terrain le permet ; sinon, le décapage de la découverte est généralement effectué, depuis le haut, à la pelle hydraulique équipée en rétro. La nature de la découverte peut être très différente de celle des matériaux exploitables (présence notamment de matière organique, de tourbe, de pyrite, très nocives surtout dans les bétons). Il est donc indispensable, là aussi, d'inclure la découverte dans le système qualité de la carrière.

■ En site hors d'eau, deux modes d'**extraction** sont possibles :

- en fouille, par pelle hydraulique équipée en rétro, pour des puissances de gisement n'excédant pas 4 m et lorsqu'il existe des zones indurées ;
- en butte, par chargeuse sur pneumatiques, pour la plupart des autres cas. Si la puissance du gisement dépasse toutefois 12 m, l'exploitation est conduite par paliers.

En site immergé, si le rabattement de la nappe est possible, on est ramené au problème précédent. Sinon, on utilise des dragues généralement à godets. Les matériaux sont traités sur la drague par criblage et lavage, ou évacués par bandes transporteuses flottantes. Lorsque la puissance du gisement est importante, on a recours à des dragues à grappin ou à des dragues suceuses.



En site semi-immersé, si le rabattement de la nappe est possible, on est ramené au cas du site hors d'eau. Si la puissance du gisement est supérieure à 10 m, on emploie des dragues. Pour les autres cas, on utilise des engins à terre en bord de fouille :

- pelle hydraulique équipée en rétro, pour les gisements pauvres en sables et à faible hauteur immergée (moins de 4 m) ;
- dragueline disposant les matériaux en cordon en bord de fouille, pour qu'ils soient repris à la chargeuse après essorage ;
- excavateur à godets monté sur chenilles parallèles au front d'extraction, et évacuant les matériaux par transporteur orientable lorsque le gisement est homogène.

■ Outre les tombereaux rigides ou articulés, comme pour les roches massives, sont utilisés plus spécifiquement :

- le transport par convoyeurs (bandes transporteuses), de loin le plus fréquent ;
- le transport hydraulique sous forme de pulpe dans des tuyauteries flottantes ;
- le transport par eau à l'aide de barges, ou de bateaux trémies auto-déchargeants pour les granulats marins en particulier.

### 1.1.3 Mâchefers d'incinération d'ordures ménagères

L'incinération des ordures ménagères génère trois familles de produits :

- des résidus solides, restant en sortie basse du four, appelés MIOM (pour mâchefers d'incinération d'ordures ménagères) et représentant 25 à 30 % des produits incinérés ;
- des cendres volantes issues directement du traitement électrostatique des fumées ;
- des résidus du traitement des gaz de ces fumées avec de la chaux et du carbone actif appelés REFIO (résidus de l'épuration des fumées d'incinération d'ordures ménagères).

En France, ces deux derniers produits sont souvent mélangés. Ils représentent 2 à 5 % du tonnage des produits incinérés. Compte tenu de leur teneur en particules de métaux lourds et en composés organo-halogénés, ils sont évacués vers des centres d'enfouissement technique, conformément à la réglementation en vigueur.

À la sortie du four, les MIOM sont fréquemment refroidis à l'eau. Ils se caractérisent alors par une teneur en eau de l'ordre de 25 %. Ils subissent de ce fait un stockage intermédiaire de quelques jours, après élimination des gros éléments supérieurs à 200 mm par un scalpeur à barreaux d'une part, et déferraillage préliminaire par un dispositif électromagnétique adapté (tambour ou *overband*) d'autre part.

Silice, alumine et calcium constituent la base de la structure minérale des MIOM. La circulaire du ministère de l'Environnement du 9 mai 1994 impose un contrôle initial puis des contrôles périodiques du potentiel polluant des MIOM à l'aide d'un test normalisé. Sont ainsi mesurés le taux d'imbrûlés, la fraction soluble, les quantités lixiviables de métaux lourds (plomb, mercure, cadmium, arsenic, chrome 6), de sulfate et de carbone organique total. En fonction des résultats obtenus, les MIOM sont classés dans l'une des trois catégories suivantes :

- catégorie V, valorisables directement ;
- catégorie M, valorisables après maturation ;
- catégorie S, stockables en centre d'enfouissement de classe 2.

### 1.1.4 Matériaux de démolition

Les centrales de recyclage sont en général situées à la lisière des agglomérations qui constituent à la fois leur principal gisement de matériaux de démolition et leur principal marché orienté essentiellement vers les travaux routiers. Ces matériaux de démolition peuvent être exclusivement constitués de béton de ciment, ou contenir également, en proportions variables, des graves ou sables traités ou non par des liants hydrauliques, des enrobés bitumineux, des briques et tuiles, des verres, voire même malheureusement du plâtre (à l'origine de gonflements), etc.

Un prétri sur le site de démolition permet d'éliminer les matériaux bannis (amiante, par exemple) et de limiter au maximum les matériaux indésirables (plâtre bien sûr, mais aussi bois, plastiques, papiers, etc.). De plus, un contrôle visuel de réception dès l'arrivée des camions à la centrale de recyclage, et un stockage sélectif, permettent de séparer au mieux les différents types de matériaux entrants.

### 1.1.5 Agrégats d'enrobés

Ils proviennent du fraisage ou de la démolition d'enrobés bitumineux ainsi que des surplus de fabrication des centrales d'enrobage. Ils peuvent être utilisés comme constituant élémentaire de mélanges hydrocarbonés, sous certaines conditions.

Dès leur arrivée sur une aire de stockage, ils sont réceptionnés en lots identifiés dans l'une des trois classes suivantes, après tri sélectif et élimination des éléments indésirables (matériaux non bitumineux, matières polluantes, etc.) :

- classe a, fraisats d'enrobés bitumineux issus d'une formule unique, réputés homogènes et de dimension maximale  $D$  inférieure ou égale à 31,5 mm ;
- classe b, fraisats d'enrobés bitumineux issus de formules diverses de  $D \leq 31,5$  mm ;
- classe c, autres enrobés bitumineux issus de déconstructions de chaussées et de surplus de centrales d'enrobage.

Les fraisats de classe a constituent les agrégats d'enrobés, lesquels sont définis par la teneur et les propriétés du liant récupéré, la granularité et les caractéristiques intrinsèques des granulats après désenrobage.

## 1.2 Traitement proprement dit

Une installation de carrière comprend plusieurs postes de fabrication, constitués par une succession d'opérations de **fragmentation (concassage)** et de **classement (criblage)** des matériaux, ainsi que des dispositifs de manutention (engins sur pneus et bandes transporteuses). Des stockages intermédiaires soit en trémies, soit en tas au sol avec reprise par extracteurs en souterrain ou par engins mobiles, assurent l'indépendance fonctionnelle des postes de fabrication.

Les opérations de réduction volumétrique peuvent éventuellement être complétées par un **tri préalable**, éliminant les éléments stériles, terreux et friables, et par des actions de **lavage** voire de débouillage, éliminant les éléments polluants argileux agglomérés entre eux ou collés à la surface des matériaux.

L'installation se compose généralement de deux ensembles distincts, l'étage primaire qui réduit les blocs d'abattage (roches massives) ou le tout-venant d'extraction (roches meubles), et l'usine d'élaboration, qui fabrique les produits finis. Les produits marchands sont ensuite stockés en trémies ou en tas dans l'attente d'être expédiés et commercialisés.

La conception d'une chaîne de concassage-criblage est conditionnée par les objectifs que l'on veut atteindre (quantités à produire, classes granulaires à obtenir) et les propriétés de la roche que l'on doit traiter (nature pétrographique et composition minéralogique, abrasivité et proportion d'éléments durs, résistance mécanique et fragilité). En outre, lorsque l'argilosité de la roche le nécessite, une unité de lavage est ajoutée à la chaîne de traitement.

### 1.2.1 Concassage

Le **concassage** consiste à réduire la taille des morceaux de roches. Le choix du type et de la taille d'un appareil de concassage est fonction de la granularité d'entrée, de la charge circulante, et du débit de sortie.

Deux types d'appareils de concassage peuvent actuellement être mis en place :

- les appareils travaillant par compression, où les matériaux subissent une action répétée d'écrasement entre deux pièces (concasseurs à mâchoires, concasseurs giratoires) ;

- les appareils opérant par chocs, où les matériaux sont soit frappés violemment par un organe tournant à grande vitesse (concasseurs à percussion et axe horizontal), soit projetés sur un écran de fragmentation sous l'effet de la force centrifuge (concasseurs à projection et axe vertical).

Le **concasseur à mâchoires** (figures 4 et 5) comprend une mâchoire fixe et une mâchoire mobile suspendue à un arbre excentrique muni d'un lourd volant d'inertie. La mâchoire mobile se rapproche de la mâchoire fixe lorsqu'elle descend ; elle s'en écarte lorsqu'elle monte, entraînant ainsi la chute des matériaux entrants. Dans les concasseurs à mâchoires dits à double effet, la partie inférieure de la mâchoire mobile décrit un mouvement horizontal. Le réglage de la largeur minimale entre les deux mâchoires permet de maîtriser la granularité des produits sortants.

Le **concasseur giratoire** (figure 6) réduit les matériaux entre un cône fixe extérieur et un cône mobile intérieur animé par un excentrique. Les phases de compression-décompression que subissent les matériaux sont beaucoup plus nombreuses que celles générées par le concasseur à mâchoires et s'accompagnent d'attrition, ce qui tend à produire des formes plus isotropes.

Le **concasseur à percussion et axe horizontal** est constitué d'un rotor muni de pièces de chocs ou percuteurs, qui tourne à grande vitesse à l'intérieur d'une enceinte fermée équipée de plaques de chocs ou enclumes. Les percuteurs du rotor frappent les matériaux entrants et les projettent sur les enclumes de l'enceinte. Le réglage de la granularité des produits sortants est effectué en agissant sur la vitesse du rotor et l'espacement entre les percuteurs et les enclumes.

Le **concasseur à projection et axe vertical** (figure 7) travaille principalement par chocs des matériaux entre eux. Le rotor tourne à grande vitesse et projette les matériaux entrants à la périphérie de l'appareil sur un talus de morceaux de matériaux. Il existe cependant d'autres machines, où les matériaux entrants viennent heurter des enclumes fixées sur le stator. La granularité des produits sortants est essentiellement conditionnée par la vitesse du rotor.



Figure 4 – Concasseur à mâchoires (photothèque LRPC Angers)



Figure 5 – Concasseur à mâchoires (photothèque LRPC Angers)



Figure 6 – Concasseur giratoire (photothèque LRPC Angers)



Figure 7 – Concasseur à projection et axe vertical (photothèque LRPC Angers)

## 1.2.2 Criblage

Le **criblage** est l'opération qui permet de séparer un ensemble de grains  $d/D$  en au-moins deux sous-ensembles  $d/m$  et  $m/D$ ,  $d/m$  étant le passant au travers de la maille de criblage  $m$  et  $m/D$  le refus sur cette même maille de criblage  $m$ .

Deux fonctions principales peuvent être distinguées :

- le criblage technique, affecté à l'orientation de la charge circulant vers une unité de concassage et/ou de stockage ;
- le criblage classificateur, destiné au tri des produits finis suivant des caractéristiques dimensionnelles spécifiées.

Le criblage est le plus souvent effectué à l'aide d'un crible vibrant (figure 8), constitué d'un arbre à balourd sur lequel sont fixées des toiles de criblage.

La toile de criblage est généralement faite de fils d'acier entrecroisés. Toutefois, lorsque les matériaux sont très abrasifs, on utilise de préférence des panneaux de polyuréthane perforés plus résistants.

La surface de criblage est calculée à partir de certaines lois qui prennent en compte la maille de criblage, le débit recherché, la granularité du matériau à cribler, sa nature et son angularité ; plus la maille de criblage est petite, plus le débit est faible.

Des grilles fixes de scalpage, à barreaux longitudinaux, peuvent en outre être placées en amont du concasseur primaire, pour éliminer les matériaux indésirables (éléments fins contenant par exemple des argiles, etc.).

## 1.2.3 Lavage

Le **lavage** a pour but d'éliminer les fines polluantes (argiles essentiellement), agglomérées entre elles ou collées à la surface des produits finis.

Les **gravillons** sont lavés sur crible par arrosage abondant (figure 9).

Les **sables** peuvent l'être au moyen de l'un des quatre procédés ci-après :

- le séparateur à cône ; le sable est introduit par le centre du cône, l'eau et les fines argileuses sont évacuées par débordement et le sable est récupéré en bas du cône ;
- le classificateur à spirale (ou décanteur à vis) ; le sable est introduit au pied d'une vis sans fin inclinée, l'eau et les fines argileuses sont évacuées par débordement au pied de la vis et le sable est entraîné vers le haut par la vis ;
- la roue essoreuse ; le sable est déversé dans une auge où il décante ; des godets perforés fixés sur une roue remontent ensuite le sable qui est récupéré dans une goulotte après renversement des godets, l'eau et les fines argileuses étant évacuées par débordement ;
- l'hydrocyclone ; le sable est introduit sous pression dans un cyclone tronconique ; une fois lavé, il est récupéré par le bas de l'appareil (sous-verse), l'eau et les fines argileuses étant évacuées vers le haut (sur-verse) par un orifice axial.

Les **tout-venants** sont lavés à l'aide d'un laveur débourbeur, cylindre métallique rotatif muni à l'intérieur de pales assurant le brassage des matériaux dans un courant d'eau. Le mouvement de rotation du cylindre est transmis par un train de pneumatiques sur lequel il repose. Les gravillons lavés sortent d'un côté, et les boues sableuses sortent de l'autre pour être dirigées vers une installation de lavage des sables.



Figure 8 – Crible vibrant (photothèque LRPC Angers)



Figure 9 – Criblage et lavage de gravillons (photothèque LRPC Angers)

## 1.3 Cas particuliers

### 1.3.1 Mâchefers d'incinération d'ordures ménagères

Les MIOM produits en usine d'incinération transitent par une installation de maturation d'élaboration (IME), laquelle est une installation classée pour la protection de l'environnement, soumise à autorisation préfectorale.

La maturation correspond à une réduction de l'humidité initiale et à une oxydation naturelle des MIOM, à une carbonatation de la chaux et à une baisse du pH. Cette dernière permet de réduire le potentiel polluant après quelques mois de dépôt et de conduire généralement au classement en catégorie V des lots de MIOM initialement classés en catégorie M.

L'élaboration a pour but de calibrer, d'épurer et d'homogénéiser les MIOM, pour obtenir, après l'extraction des ferrailles résiduelles avec un système électromagnétique et l'élimination des métaux non ferreux au moyen de dispositifs à courant de Foucault, des graves 0/D dont le  $D$  avoisine 30 mm.



### 1.3.2 Matériaux de démolition

Les plus gros éléments de béton font l'objet d'une première réduction à l'aide d'un brise roche hydraulique (BRH). Les plus longs sont coupés par une pelle équipée de pince pour extraire la majeure partie des fers. Un premier criblage permettant d'éliminer les matériaux à faibles caractéristiques est souvent suivi d'un tri manuel destiné à retirer les impuretés (bois, plastiques, papiers, etc.).

Un concassage primaire, suivi d'un déferrailage électromagnétique, permet de fournir des graves primaires marchandes. Éventuellement, un concassage secondaire, portant sur la fraction granulaire supérieure issue du concassage primaire, produit des gravillons et des sables normalisés.

### 1.3.3 Agrégats d'enrobés

Pour être utilisables en tant qu'agrégats d'enrobés, les fraisats de classe b doivent préalablement faire l'objet d'une homogénéisation et les matériaux de classe c d'un concassage suivi d'une homogénéisation.

L'emploi des agrégats d'enrobés dans la formulation des mélanges hydrocarbonés pour chaussées, conduit à déterminer plusieurs taux de recyclage selon leurs caractéristiques et l'usage auquel ils sont destinés.

## 2. Protection de l'environnement

Les carrières sont souvent ressenties par le grand public au travers des atteintes qu'elles portent à l'environnement, par suite des nuisances qu'elles occasionnent et des bouleversements des sols et des paysages, qu'elles engendrent. Sous la pression des écologistes, les producteurs de granulats se sont mobilisés ; des progrès importants ont été accomplis en matière de réduction des bruits, des vibrations et des poussières, de traitement des eaux et des boues, de réhabilitation des sites de production, etc.

Parallèlement, la législation sur les carrières a été modifiée et renforcée dans le but de protéger efficacement le cadre de vie. Par la loi du 4 janvier 1993, accompagnée des décrets et circulaire d'application du 9 juin 1994, les carrières ont été transférées du code minier à la législation sur les installations classées « hautement polluantes », lesquelles sont définies par la loi du 19 juillet 1976.

Désormais, toutes les exploitations, quels que soient les seuils de superficie et de production, sont soumises à **autorisation**, avec production d'une étude d'impact analysant les effets du projet sur l'environnement. Le dossier fait l'objet d'une enquête publique d'une durée d'un mois dans chacune des communes intéressées, puis est soumis pour avis à la commission départementale des carrières. L'autorisation d'ouverture et d'exploitation est délivrée par arrêté préfectoral pour une durée maximale de trente ans renouvelable. Il y a en outre maintenant obligation, pour tout producteur de granulats, d'apporter des garanties financières destinées à la remise en état de son site, après exploitation, ou pendant celle-ci en cas de défaillance. L'arrêté du 10 février 1998, assorti d'une circulaire du 16 mars 1998, en fixe les conditions et les modalités pratiques d'application.

De plus, un **schéma définissant les conditions générales d'implantation des carrières** doit désormais être institué dans chaque département. Ce schéma est élaboré par la commission départementale des carrières et approuvé par le préfet après avis du conseil général. Il doit prendre en compte les ressources et les besoins en matériaux du département et des départements voisins, la protection des sites et des milieux naturels sensibles, la nécessité d'une gestion équilibrée de l'espace, tout en favorisant une uti-

lisation économe des matières premières. Il fixe en outre les objectifs à atteindre en termes de remise en état et de réaménagement des sites. Les autorisations d'exploiter doivent bien évidemment être compatibles avec le schéma.

Par ailleurs, l'arrêté ministériel du 22 septembre 1994 définit les prescriptions administratives et techniques qui doivent être respectées pour l'exploitation d'une carrière, par exemple :

- obligation de faire une déclaration de début d'exploitation ;
- interdiction d'extraire dans le lit mineur des cours d'eau ;
- interdiction d'extraire à moins de 35 m des rives d'un cours d'eau ;
- tenue de plans d'exploitation mis à jour au moins une fois par an ;
- obligation de faire le nécessaire en matière de prévention des risques de pollution des eaux et de l'air, et de nuisance par le bruit et les vibrations ;
- obligation de remettre en état après exploitation.

Il convient enfin de rappeler que les granulats sont assujettis à la taxe générale sur les activités polluantes depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2000.

## 3. Maîtrise de la qualité

La qualité d'un granulat, c'est d'abord un niveau de spécification pour un usage donné, c'est ensuite le maintien de ce niveau de spécification dans le temps.

Pour le producteur, tout cela nécessite la connaissance de son gisement, la maîtrise de sa chaîne de production, la caractérisation de ses produits fabriqués, l'établissement d'une fiche technique de synthèse et d'engagement pour chacun d'eux, la mise en place et l'application d'un plan d'assurance qualité.

■ Depuis le 1<sup>er</sup> juin 2004, les **normes européennes granulats** harmonisées sont d'application obligatoire en France, les anciennes normes françaises étant retirées. En conséquence, le marquage CE des granulats entrant dans le champ de ces normes européennes est également devenu obligatoire à compter de cette date.

Trois normes européennes de spécifications des granulats intéressent plus particulièrement les domaines des chaussées et des bétons hydrauliques :

- NF EN 13242 Granulats pour matériaux traités aux liants hydrauliques et non traités ;
- NF EN 13043 Granulats pour mélanges hydrocarbonés et enduits superficiels ;
- NF EN 12620 Granulats pour bétons.

Ces normes européennes définissent des catégories ou classes pour chaque caractéristique de granulats, déterminées à partir d'essais européens normalisés.

Le **marquage CE** des granulats est issu du mandat M 125 que la Commission européenne a donné au Comité européen de normalisation. Rappelons que le marquage CE des produits de construction permet de présumer la conformité des ouvrages vis-à-vis des exigences essentielles (stabilité et durabilité des ouvrages en particulier) de la directive européenne sur les produits de construction, mais dans la mesure seulement où ceux-ci sont correctement mis en œuvre.

À ce titre, le producteur est tenu d'appliquer un système de maîtrise de sa production, qui comprend notamment la réalisation d'essais initiaux de caractérisation et d'essais périodiques de vérification, ainsi que le traitement des non-conformités.

Le producteur a la responsabilité du marquage CE de ses granulats. Il déclare qu'il maîtrise son système de production en appliquant toutes les dispositions prévues par les normes européennes granulats. Il établit ainsi une attestation de conformité, qui peut être :

- de niveau 4, s'il s'agit d'une simple déclaration de sa part ;
- de niveau 2+, si cette même déclaration s'appuie sur un audit d'inspection effectué par un organisme indépendant, notifié par un État membre.

Si le producteur peut choisir entre ces deux niveaux d'attestation de conformité pour mettre ses granulats sur le marché, les maîtres d'ouvrage tendent à imposer le niveau 2+. Par ailleurs, si le marquage CE atteste d'un niveau de maîtrise du système de production, il ne peut seul constituer un gage de conformité des granulats aux spécifications d'usage d'un marché et n'exonère pas le maître d'ouvrage de la réalisation de ses contrôles.

■ De plus, la **norme française expérimentale XP P 18-545** (Granulats – Éléments de définition, conformité et codification) d'application volontaire vient expliciter, préciser et compléter ce dispositif normatif européen, pour tenir compte du niveau d'exigence requis par les techniques actuelles d'une part, et du tissu industriel existant d'autre part.

Elle regroupe ainsi plusieurs caractéristiques sous forme de codes, eux-mêmes définis à partir de catégories européennes. Elle introduit aussi la possibilité, pour les gravillons, d'utiliser sous certaines conditions une règle de compensation (entre résistance à la fragmentation et résistance à l'usure) et des critères de régularité granulométrique (tolérances à  $d$  et  $D$ ), indispensables aux pratiques françaises courantes. Elle permet enfin de maintenir deux notions employées en France depuis de nombreuses années mais qui n'ont pas encore été reprises à l'échelon européen, à savoir les critères de conformité et d'acceptation et la fiche technique produit ou FTP, laquelle synthétise les valeurs spécifiées des caractéristiques normalisées du produit, que le producteur s'engage à respecter, et les résultats des essais les plus récents effectués par le producteur sur ce même produit.

Il existe en outre une **marque NF granulats**, qui est une certification française de produits, volontaire, fondée sur l'application des normes françaises et européenne précédemment évoquées, et dont le droit d'usage est accordé et renouvelé par Afaq-Afnor-Certification, après un audit initial d'inspection et des audits périodiques de surveillance.

Elle prouve que les granulats sont conformes à ces normes, que les valeurs spécifiées de leurs caractéristiques ont été vérifiées et validées par un organisme indépendant et qu'elles sont effectivement respectées de façon continue par le producteur, donc que ces produits sont aptes à être utilisés pour l'usage prévu. Même si elle accroît la confiance du maître d'ouvrage, elle ne le dispense pas de contrôler de tels granulats certifiés.

La qualité d'une fourniture de granulats, c'est non seulement le respect des exigences du marché, mais c'est avant tout l'homogénéité des caractéristiques contrôlées. Cette régularité constitue d'ailleurs l'une des clés de la réussite du chantier.

Pour le maître d'ouvrage, tout cela implique de fixer des spécifications d'usage adaptées à ses propres besoins, d'utiliser des granulats répondant au mieux à ses critères de choix, et d'effectuer tous les contrôles nécessaires pour vérifier que les granulats sont conformes à son attente et ont en plus cette régularité tant recherchée.

## 4. Spécifications d'usage

### 4.1 Domaine des chaussées

Les spécifications d'usage ont été fixées en fonction du trafic poids lourds, de la position de la couche considérée dans la structure de chaussée et de la technique routière utilisée pour sa réalisation (traitée ou non par un liant hydraulique ou hydrocarboné essentiellement). Elles sont d'autant plus exigeantes que le trafic lourd est

plus intense, que la couche est plus proche de la surface de la chaussée, que le liant est plus souple, que son dosage est plus faible et que son temps de prise est plus long, enfin que les propriétés mécaniques du produit routier employé sont plus faibles. Elles prennent aussi en compte une hétérogénéité possible des fournitures de granulats et un niveau courant d'aléas de chantier.

Ces spécifications d'usage ont été établies sur la base de résultats probants d'études en laboratoire et d'expérimentations sur chaussées, puis de bilans de comportement à long terme. Elles sont en outre confortées par l'expérience acquise grâce aux travaux de construction, de réhabilitation et d'entretien des routes et des autoroutes depuis plus de trente ans. Elles permettent de réaliser les chantiers dans de bonnes conditions et d'obtenir la qualité finale visée lorsque les exigences des marchés et des règles de l'art relatives à la fabrication et à la mise en œuvre des produits routiers, sont satisfaites.

Des spécifications d'usage pour les assises et les revêtements de chaussées sont suggérées dans la note d'information n° 10 du Comité français pour les techniques routières (CFTR). Elles sont fondées sur les normes européennes et française granulats (§ 3) d'une part, et sont calquées sur le standard existant pratiqué depuis maintenant plus de trois décennies d'autre part. L'objectif affiché est de guider les maîtres d'ouvrage dans leur choix. Rappelons que le CFTR regroupe des donneurs d'ordre et des professionnels, qui représentent l'ensemble de la communauté technique routière nationale de façon paritaire et partenariale.

Il résulte de tout cela que les spécifications d'usage conseillées pour les assises sont moins sévères que celles proposées pour les revêtements, lesquels nécessitent des granulats très résistants, concassés et peu polissables.

Par ailleurs, le recours à la règle de compensation entre les résistances à l'usure et à la fragmentation (cf. XP P 18-545) est généralement justifié par l'expérience technique régionale, avec le souci d'une utilisation rationnelle de la ressource sur le bassin susceptible d'alimenter le chantier, et la perspective d'une réduction des coûts de transport. De même, l'ajout de critères de régularité granulométrique est systématiquement motivé par la volonté de fabriquer et mettre en œuvre des produits routiers de granularité constante.

#### 4.1.1 Assises

■ Pendant la phase de travaux, les diverses opérations de manutention, de stockage, de reprise, de fabrication et de mise en œuvre, font subir aux granulats des frottements réciproques qui amènent une usure avec production de particules fines ; les granulats sont d'autant plus sensibles à cette attrition qu'ils sont plus anguleux, moins résistants et plus hétérogènes. Le compactage soumet en outre les granulats à des chocs répétés qui conduisent à une fragmentation avec formation d'éléments de toutes dimensions. Après sa mise en service, la chaussée encaisse des sollicitations mécaniques dues en grande partie à la circulation des poids lourds ; les granulats évoluent alors différemment selon la technique routière mise en place.

Dans une **assise non traitée par un liant hydrocarboné ou hydraulique**, les granulats ne sont pas liés entre eux et subissent de ce fait, sous l'action agressive du trafic poids lourds, une fragmentation et une usure dans toute la masse de l'assise. Le phénomène d'attrition est d'autant plus important que la granularité du produit routier est plus creuse et sa compacité plus faible. L'attrition génère du sable et des fines, modifiant ainsi la granularité du produit routier ; cette évolution se fait toujours au détriment de la stabilité mécanique de l'assise, et peut aussi diminuer sa perméabilité.

L'emploi d'un **liant hydrocarboné** amène une liaison « souple », qui limite les mouvements relatifs des granulats mais ne les supprime pas.

Avec un **liant hydraulique**, après la prise, les granulats sont liés entre eux et ne se déplacent plus les uns par rapport aux autres. Cependant, la fissuration de l'assise traitée, due au retrait ther-



mique, entraîne des frottements réciproques des granulats de part et d'autre des fissures, à chaque passage de poids lourds. Elle favorise en outre l'infiltration de l'eau, ce qui accélère encore l'attrition.

■ La recherche d'économies dans les projets impose d'utiliser au mieux les **matériaux disponibles localement**, en ayant recours au besoin à des granulats encore mal connus donc peu employés dans les produits routiers parce que ne répondant pas forcément à des spécifications d'usage de maîtres d'ouvrage. Leur utilisation se justifie aussi par l'épuisement de certaines ressources classiques et par les exigences accrues en matière de protection de l'environnement. En France, des actions sont actuellement menées pour favoriser le développement de leur emploi en assises de chaussées, notamment dans les régions où des problèmes d'approvisionnement se posent aujourd'hui avec acuité (bassin parisien et bassin aquitain, par exemple).

De tels **granulats non traditionnels** ne peuvent cependant être utilisés que si des résultats d'études et d'expérimentations préalables permettent d'évaluer les risques encourus avec précision. De plus, leur emploi ne doit en aucun cas se traduire par un abaissement quelconque de la qualité finale des assises ; en d'autres termes, cette qualité finale doit impérativement être la même quel que soit le niveau de performance des granulats entrant dans la composition des produits routiers. L'utilisation de ces granulats non traditionnels implique par ailleurs une parfaite maîtrise de leur homogénéité ainsi qu'une bonne connaissance de leurs limites et précautions d'emploi. Elle nécessite aussi la mise au point de méthodes spécifiques adaptées à leurs caractéristiques géotechniques, en jouant par exemple sur les propriétés mécaniques des produits routiers et sur le dimensionnement des assises voire des structures de chaussées. Elle impose enfin des conditions particulières de chantier et des sujétions supplémentaires de mise en œuvre, qui permettent d'obtenir la qualité finale visée et de réduire au maximum les risques encourus.

Le CFTR a mis en place une méthodologie de valorisation et de promotion d'un granulat non traditionnel local. Elle consiste à identifier le facteur de risque, à évaluer ce risque par des expérimentations sur chaussées suivies dans le temps, puis à diffuser les résultats obtenus sous forme de **guide technique régional**. Ce guide doit renseigner principalement sur les caractéristiques géotechniques du granulat en question, ses utilisations possibles, ainsi que sur les conditions, limites et précautions particulières d'emploi. Le fait que ces éléments d'information aient été déduits de tests en vraie grandeur incite à penser que les risques encourus sont maîtrisables dès lors que la procédure qualité est strictement appliquée. L'initiative de la démarche et l'élaboration du guide sont du ressort des parties prenantes de l'échelon local concerné, le CFTR validant le projet avant sa publication ; cette validation consiste à vérifier la méthode appliquée, le contenu du document, ainsi que la fiabilité et la cohérence des préconisations par rapport au référentiel technique retenu. Il existe aujourd'hui plusieurs guides techniques régionaux de ce type ; des assises ont même été réalisées dès leur parution, conformément à leurs recommandations pratiques.

Mais il ne faut pas oublier que plus on assouplit une spécification d'usage, plus on se rapproche du seuil limite qu'il est impératif de ne jamais franchir, et par conséquent, plus la caractéristique contrôlée doit être homogène et plus la surveillance doit être renforcée ; c'est un peu « l'histoire de la tentation marginale vers la réalité scientifique ».

#### 4.1.2 Revêtements

Les granulats pour couche de roulement doivent remplir trois fonctions :

— **rester dans le produit routier** que l'on a choisi de mettre en place ; c'est le rôle de la granularité, de la forme, de l'angularité et

de la propreté vis-à-vis notamment de la stabilité immédiate ; c'est aussi le problème de l'adhésivité avec le liant vis-à-vis principalement de la tenue dans le temps ;

— **se maintenir dans leur intégrité là où ils sont**, donc conserver toutes leurs propriétés aussi longtemps que possible ; c'est le rôle essentiel de la résistance mécanique exprimée en termes de résistance à la fragmentation et de résistance à l'usure ;

— **assurer de bonnes caractéristiques antidérapantes**, ce qui fait intervenir la granularité, la forme et l'angularité, pour la macrotexture de la surface routière d'une part, et la résistance au polissage pour la microtexture de celle-ci d'autre part, la résistance au polissage étant liée aux aspérités de surface des gravillons ou microrugosité.

Si la granularité et la forme des granulats, la formule et la mise en œuvre du revêtement influencent l'obtention d'une surface initiale antidérapante, la résistance mécanique, l'angularité et la microrugosité jouent un rôle important dans son évolution sous l'action du trafic poids lourds. La fragmentation maintient l'angularité et la microrugosité mais fait disparaître rapidement les gravillons. L'usure diminue progressivement l'angularité et augmente les surfaces susceptibles de se polir. Il faut donc trouver des gravillons et des conditions d'utilisation pour lesquels la fragmentation et l'usure soient réduites au maximum et pour lesquels le poli ne puisse se développer.

Plus une roche contient de minéraux durs, plus elle est difficile à polir ; seuls les minéraux tendres atteignent un bon poli. Il en résulte que les roches riches en calcite se polissent très vite, les roches riches en feldspaths moyennement vite et les roches riches en quartz pratiquement pas, abstraction faite de leur structure.

Lorsqu'une roche contient des minéraux de duretés différentes, il y a toujours une usure différentielle laissant les plus durs en relief et les plus tendres en creux. On obtient alors une microrugosité limite qui n'est jamais un bon poli. La roche idéale serait composée pour moitié de minéraux durs et pour moitié de minéraux tendres.

Il existe cependant une contradiction entre résistance au polissage et résistance mécanique, l'une s'obtenant toujours au détriment de l'autre : c'est la présence de minéraux tendres parmi des minéraux durs qui favorise une bonne résistance au polissage, mais fait alors chuter fortement la résistance mécanique. De même, lorsque la porosité d'une roche croît, sa résistance au polissage augmente mais sa résistance mécanique diminue.

Les roches ayant simultanément d'excellentes résistances à la fragmentation, à l'usure et au polissage sont rares : la résistance à la fragmentation des quartzites, la résistance à l'usure des microdiorites et la résistance au polissage des basaltes ne sont pas toujours très bonnes. De façon générale, on constate qu'une structure fine et une porosité faible confèrent une résistance mécanique forte. Mais pour les roches à résistance mécanique élevée et à faible contraste de dureté des minéraux, on arrive fréquemment à un mauvais état de poli final.

## 4.2 Domaine des bétons

Pour les bétons de chaussées, des spécifications d'usage figurent aussi dans la note d'information n° 10 du CFTR, à titre de suggestion.

Pour les bétons destinés aux bâtiments et aux ouvrages de génie civil, c'est à l'acquéreur de granulats qu'il appartient de définir ces spécifications d'usage dans son cahier des charges, en fonction du type de construction, de la qualité du béton et de divers risques d'exposition. Pour ce faire, il utilise les prescriptions de la norme française XP P 18-545, laquelle s'appuie sur la norme européenne NF EN 12620.

Là encore, l'homogénéité des caractéristiques des granulats est essentielle, et en particulier la régularité de la granularité des sables.

De plus, si l'angularité des granulats ne conditionne qu'assez faiblement et indirectement la résistance du béton durci, en revanche elle a une très forte influence sur la maniabilité du béton frais, ce qui incite les entreprises de mise en œuvre à utiliser préférentiellement des granulats alluvionnaires roulés, aux formes arrondies. Il n'en demeure pas moins vrai que dans les régions pauvres en matériaux alluvionnaires, on sait formuler des bétons à base de granulats concassés, anguleux donc à arêtes vives, moyennant notamment l'incorporation d'additifs voire d'adjuvants particuliers.

Par ailleurs, certains minéraux peuvent dégrader les bétons :

- les variétés amorphes de la silice (opale, calcédoine) et les phases vitreuses siliceuses, peuvent générer des désordres dus à l'alcali-réaction avec les alcalins du ciment ;
- le gypse et la pyrite sont susceptibles de produire des réactions sulfatiques ;
- les argiles sont parfois responsables de gonflements par réaction avec d'autres éléments ;
- la présence d'oxydes de fer et l'oxydation de pyrites tendent à développer des taches de rouille sur les parements.

En outre, l'utilisation de silex, dans une gamme de teneurs pessimales (cf. [C 902v2, § 3.2.4]), peut occasionner des désordres dus à l'alcali-réaction. Enfin, la subsistance de plâtre dans les matériaux de démolition est susceptible de générer des gonflements par réaction avec d'autres éléments.

## 5. Marché des granulats en France

### 5.1 Production

La production française de granulats atteint environ 400 millions de tonnes par an depuis 2000 sans variation sensible depuis (cf. [C 903v2]). Cette production se répartit approximativement de la façon suivante :

- granulats alluvionnaires ..... 34 % ;
- granulats marins ..... 2 % ;
- autres sables ..... 5 % ;
- granulats éruptifs ..... 29 % ;
- granulats calcaires ..... 25 % ;
- granulats artificiels ..... 2 % ;
- granulats recyclés ..... 3 %.

Il convient de préciser que les granulats représentent plus des trois quarts de la production annuelle de substances minérales en France.

### 5.2 Consommation

La consommation française de granulats est aussi estimée à 400 millions de tonnes par an depuis 2000 sans variation sensible depuis (cf. [Doc. C 903v2]), soit à 20 kg par jour et par habitant. Le granulat est ainsi la ressource la plus consommée après l'eau.

Par nature d'ouvrages, le génie civil utilise plus des trois quarts de ce tonnage total, la quantité restante étant destinée au bâtiment. Les infrastructures de transport, et plus particulièrement les autoroutes et les routes, représentent plus de la moitié de la demande globale de granulats. Quelques consommations élémentaires méritent d'être indiquées :

- 1 logement : 100 à 300 t ;
- 1 lycée : 20 000 à 40 000 t ;
- 1 km de route : environ 12 000 t ;
- 1 km d'autoroute : environ 30 000 t ;
- 1 km de voie ferrée : environ 10 000 t.

Par nature d'emplois, les bétons hydrauliques absorbent environ 33 % du tonnage total consommé, les enrobés bitumineux 11 %, les enduits superficiels d'usure 1 %, le solde étant utilisé pour les assises de chaussées traitées ou non par des liants hydrauliques, les sous-couches et ballasts ferroviaires, etc.

Le commerce extérieur reste limité et équilibré : près de 9 millions de tonnes de granulats par an depuis 2000 sont exportés essentiellement vers l'Allemagne et la Suisse, tandis qu'une quantité annuelle équivalente est importée principalement de Belgique et de Grande-Bretagne.

### 5.3 Transport

Il convient de retenir que les maîtres d'ouvrage utilisent de préférence les granulats les plus proches des chantiers parce que les contraintes de distance et de coût de transport s'avèrent généralement plus fortes que celles des techniques d'emploi. D'ailleurs, les flux de granulats sur longues distances sont extrêmement faibles ; ils portent presque exclusivement sur des besoins particuliers qui nécessitent des granulats spécifiques comme par exemple les couches de roulement des chaussées à fort trafic. Cela confirme le caractère régional et plus souvent local du marché des granulats, et explique l'importance des transports routiers sur courtes distances ainsi que la grande dispersion territoriale des lieux de production. C'est ainsi que 93 % des granulats utilisés sont acheminés par la route avec une distance moyenne de livraison de 40 km (4 % le sont par la voie d'eau sur une distance moyenne de 140 km et 3 % par la voie ferrée sur en moyenne 210 km).

Produits pondéreux de faible valeur ajoutée, les granulats se transportent en effet difficilement par camions sur de longues distances car leur coût double au-delà de 40 à 50 km de transport. *A contrario*, l'épuisement de certaines ressources traditionnelles tend à éloigner les zones de production des centres de consommation donc à accroître le poids du transport dans le coût rendu des granulats. C'est pourquoi, le paramètre transport constitue de plus en plus un enjeu important pour l'économie des projets. Il doit donc inciter les acquéreurs, comme d'ailleurs les producteurs, à rechercher plus que jamais le mode de transport qui leur assure le meilleur service au meilleur coût.

Le **transport par route** relie directement la carrière au chantier. D'une grande souplesse, il est particulièrement bien adapté aux livraisons sur courtes distances. Cependant, il consomme relativement beaucoup d'énergie et occasionne parfois certains désagréments (dégradation des voiries secondaires, gêne des usagers de la route, perturbation de l'environnement urbain, etc.). Le coût de transport dépend essentiellement de la durée du parcours et des possibilités de fret retour.

Le **transport par voie d'eau** sert essentiellement à approvisionner les centrales à béton implantées dans des ports fluviaux, à partir de granulats alluvionnaires. Mais il ne peut valablement être utilisé, malgré son faible coût énergétique, que sur les voies navigables accessibles aux unités de fort tonnage et pour des distances supérieures à 80 voire 100 km. Ce mode de transport nécessite en outre, aux lieux de départ et d'arrivée, des dispositifs d'accostage ainsi que des systèmes de chargement et de déchargement spécialisés.

Le **transport par fer** est principalement utilisé pour acheminer des granulats éruptifs résistants et peu polissables vers des centres de consommation qui ne possèdent pas à proximité de tels granulats pour la réalisation des couches de roulement des chaussées à trafic élevé. Il limite les dépenses énergétiques et les nuisances. Toutefois, il exige une programmation rigoureuse des approvisionnements compte tenu des contraintes liées à la circulation des trains. De plus, l'expédition et la réception des rames complètes de wagons imposent systématiquement des infrastructures ferroviaires de grande capacité aux points de départ et d'arrivée.

## 6. Conclusion

Les granulats représentent, en poids et en volume, la part la plus importante des **bétons hydrauliques** et des **produits routiers**. De par ce fait, c'est assez largement à eux qu'il incombe d'assumer les performances mécaniques de ces matériaux de construction, sans perdre de vue le rôle essentiel du liant qui est de les maintenir en place.

Les caractéristiques des granulats dépendent de la nature et de la qualité du matériau d'origine d'une part, et de leurs conditions d'exploitation et d'élaboration d'autre part. Les propriétés géométriques et de propreté peuvent être considérablement améliorées en mettant en œuvre des méthodes d'extraction, de fragmentation et de classement appropriées, alors que les propriétés intrinsèques ne peuvent être que peu influencées par la fabrication. L'homogénéité de toutes ces caractéristiques, c'est-à-dire la régularité des

fournitures de granulats, constitue l'objectif prioritaire que tout producteur doit viser et que tout maître d'ouvrage doit vérifier.

L'évocation de l'origine d'une ressource ne suffit pas à en définir les usages. Au sein d'une famille, les caractéristiques géotechniques peuvent en effet être très différentes. De même qu'autrefois, les hommes sélectionnaient les matériaux les plus aptes à la réalisation des ouvrages, en ayant recours aux règles de l'art de leur époque (« le sable doit crisser dans la main », « le pavé doit rendre un son clair au marteau »), aujourd'hui, les ingénieurs imposent des exigences contraignantes aux granulats, portant sur des propriétés très diverses fonction du type d'emploi, et fondées sur des essais conventionnels normalisés.

Les spécifications d'usage actuelles tendent généralement à concilier le souhaitable et le possible, les impératifs techniques et les contraintes économiques, dans le cadre d'une gestion optimale des ressources existantes et potentielles au mieux des intérêts de la collectivité, et dans un souci de développement durable.