



كلية العلوم  
FACULTÉ DES SCIENCES



جامعة مولاي إسماعيل  
UNIVERSITÉ MOULAY ISMAÏL

# Master spécialisé «Géosciences appliquées »

Module

## **CARRIERES ET GEOMATERIAUX**

(PARTIE DU PR. AISSA MASROUR)



# Chapitre I

## INTRODUCTION GENERALE

### I/ NOTION D'UNE CARRIERE

Une carrière du latin *quadrus* = carré (en lien certainement à la forme des pierres de taille...), est un endroit d'où sont extraits des matériaux de construction : pierres, sable ou différents minéraux non métalliques et non concessibles, par opposition aux mines. Le terme carrière désigne une installation industrielle complète comprenant un lieu d'extraction, avec les machines servant à traiter la roche extraite, des hangars, des ateliers et des zones de stockage... Une carrière donc est un site d'exploitation plus ou moins vaste (de un hectare à plusieurs dizaines) de substances minérales non métalliques et non énergétiques dont la nature, la qualité et le cubage sont économiquement exploitables (**Fig.1**). Dans les carrières de roches dures, les roches mécaniquement résistantes permettent que les fronts de taille restent visibles durant plusieurs dizaines, voire centaines d'années.

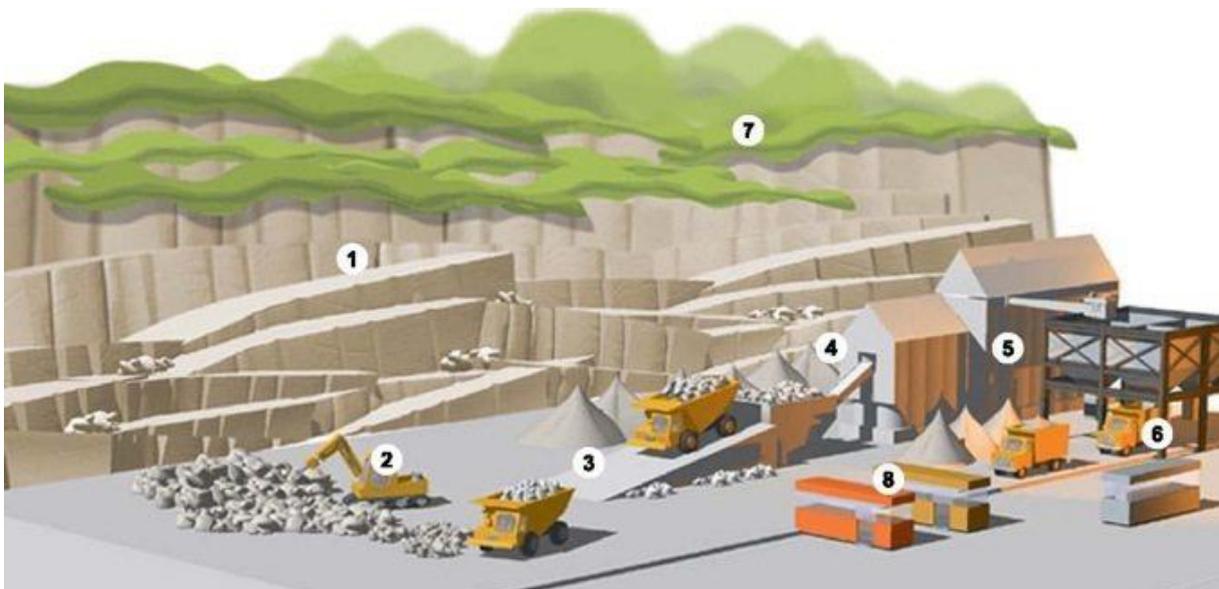


Fig.1 – Schéma d'une carrière de pierre solide à ciel ouvert

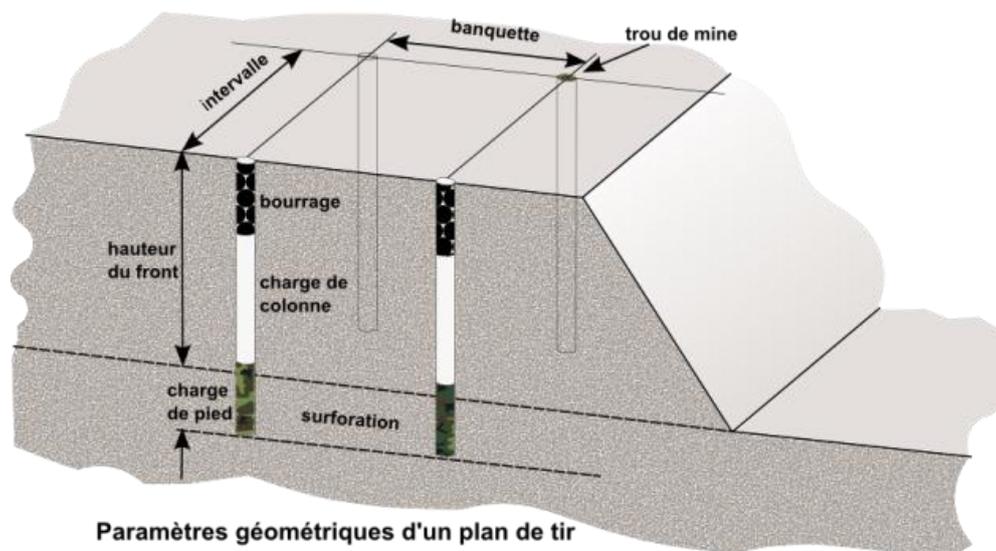
Une carrière, c'est le lieu d'où sont extraites, à partir d'un gisement de roche, les pierres nécessaires pour la construction des bâtiments, des routes, etc. Pour qu'il y ait une carrière, il faut donc tout d'abord qu'il y ait un gisement de matériaux dans le sous-sol. Il faut que la géologie soit favorable.

Pour qu'il y ait une carrière, il faut ensuite un **carrier** (employé à la carrière) et un industriel promoteur qui a la volonté d'exploiter les pierres du sous-sol.

Comme l'exige la réglementation sur les installations classées pour la protection de l'environnement, le carrier va devoir constituer un dossier et demander une autorisation pour pouvoir exploiter la pierre qui l'intéresse. Il va préparer un dossier d'étude d'impact pour obtenir l'autorisation d'ouvrir une carrière.

L'obtention de produits commercialisables passe par une activité d'extraction, avec des techniques différentes selon la nature de la roche, puis par une activité de transformation à l'aide d'installations de concassage, de criblage et de lavage et enfin diffusion ou distribution des produits.

## 1 / Tir de mine



Une fois que la terre végétale et les stériles situés au-dessus des niveaux à exploiter ont été retirés, il faut utiliser des explosifs pour fragmenter et abattre les matériaux. Chaque tir obéit à un plan de tir précis définissant la foration (l'emplacement

et le nombre de trous), le type d'explosifs, sa quantité, l'heure du déclenchement et les conditions de sécurité lors de l'opération. C'est le boute-feu, professionnel spécialisé et formé en conséquence, qui est le responsable des tirs de mines. La fréquence des tirs de mines est propre à chaque carrière.

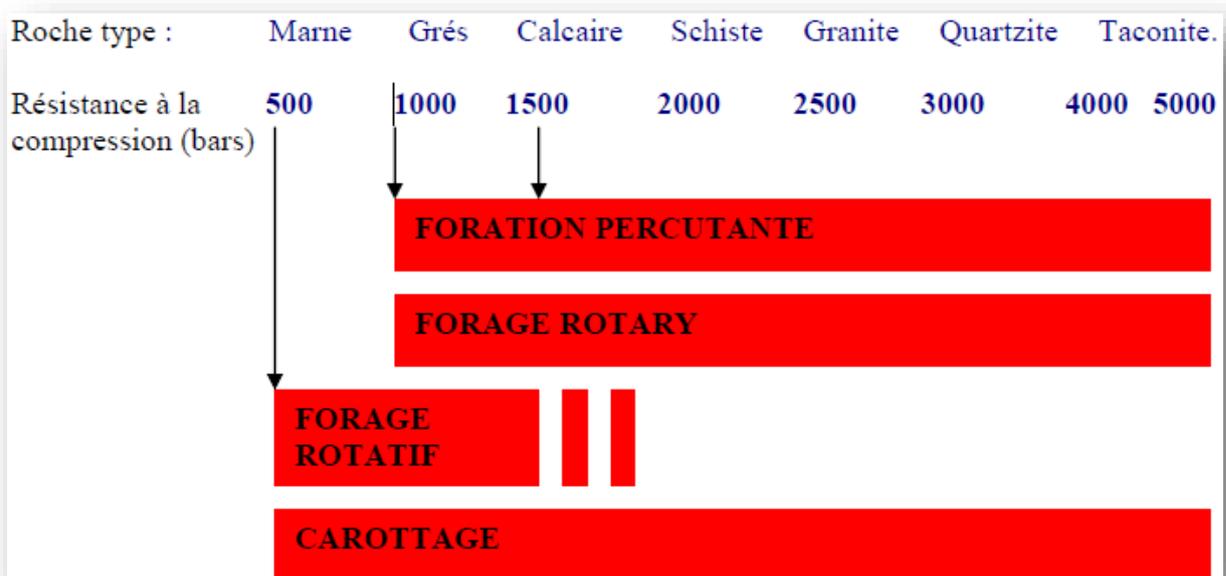
**Les banquettes** =  $40 \times$  diamètre de foration ( entre 1,5" (38 mm) et 15" (380 mm)

**Les espacements** (intervalles entre les trous de mines) =  $1 \times$  banquette < espacement <  $1,3 \times$  banquette. La hauteur du front, la surforation

**La maille de foration** = banquette  $\times$  espacement

**La hauteur de front** : est souvent limitée à **15 mètre** (imposée par la réglementation...)

**La maille produit** par ces deux valeurs  $\times$  la hauteur du front = le volume abattu.



Type de forage pour placement de mines en fonction de la nature de la roche

Banquette tire d'abattage = 40 x diamètre de foration

<b>Diamètre</b>	56 mm	76 mm	89 mm	102 mm	127 mm	165 mm
<b>Banquette</b>	2,0 m	3,0 m	3,6 m	4 m	5 m	6,6 m

tableau de calcul pour une banquette de tire d'abattage

L'espacement (intervalles entre les trous de mines) = 1 x banquette < espacement < 1,3 x banquette

<b>Diamètre</b>	56 mm	76 mm	89 mm	102 mm	127 mm	165 mm
<b>Espacement</b>	2,0 à 2,6 m	3,0 à 3,9 m	3,6 à 4,6 m	4 à 5,2 m	5 à 6,5 m	6,6 à 8 m

tableau intervalles entre les trous de mines

## 2/ Reprise des matériaux bruts

Les blocs de roche issus des tirs de mines, appelés également tout-venant, sont repris par des pelles et chargés dans des dumpers ou acheminés par des bandes transporteuses vers l'installation de traitement.

## 3/ Transport sur piste

Les dumpers, camion à grandes roues d'une charge de 50 tonnes, transportent le matériau au broyeur primaire en empruntant les pistes de la carrière. La sécurité de la circulation est primordiale sur un site d'exploitation.

## 4/ Traitement des granulats

Les matériaux bruts vont subir des opérations de concassage, de criblage et de lavage afin d'obtenir une gamme variée de granulats qui répondront aux critères techniques nécessaires à leur mise en œuvre. (Fig.2)

## 5/ Stockage

Le stockage des produits finis s'opère sous forme de tas individualisés au sol, soit en silos, en particulier pour les granulométries les plus fines.

## 6/ Chargement et livraison clients

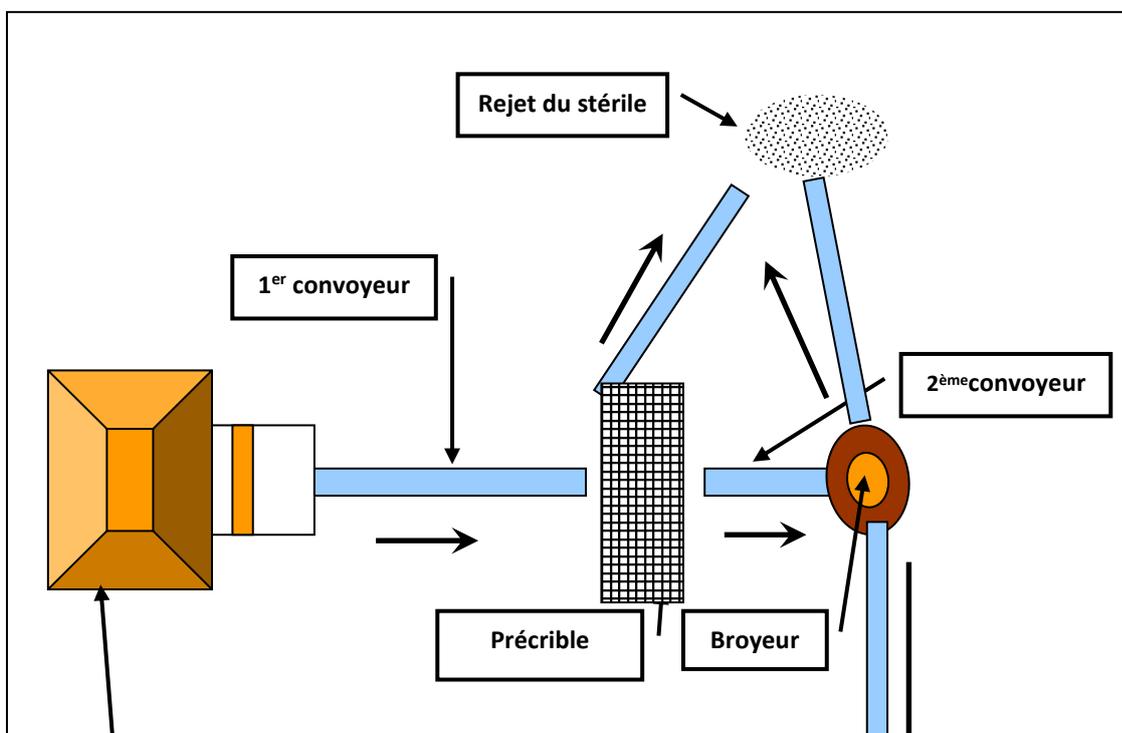
Les camions sont chargés et pesés sur un pont-bascule afin d'éviter tout risque de surcharge. Un arrosage ou un bâchage est recommandé avant la sortie de la carrière. Le granulat est généralement livré dans un rayon inférieur à 30 kilomètres autour de la carrière. Quelques grandes carrières ont également un raccordement au rail pour des livraisons sur de plus longue distance, réduisant ainsi la circulation des camions sur les routes.

## 7/ Zone réaménagée

Tandis que la carrière continue à être travaillée en profondeur, son impact est réduit par la restauration progressive des fronts supérieurs et par la plantation des banquettes. Des matériaux stériles sont également employés pour créer des merlons qui cassent les cônes de vues vers la carrière.

## 8/ Pilotage de l'installation, Bureaux et Labo

Pour le bon fonctionnement d'une carrière il est nécessaire d'assurer un contrôle permanent de la chaîne de traitement, depuis l'alimentation jusqu'au stockage ou à l'expédition. Un contrôle régulier des caractéristiques des granulats produits permet de garantir la qualité exigée par les clients.



**Fig.2- Schéma synoptique de l'unité de traitement projetée à la carrière**

### **III/ CLASSIFICATION DES MATERIAUX DE CARRIERE**

Les carrières peuvent être souterraines ou à ciel ouvert. Elles exploitent des roches meubles (éboulis, alluvionnaires) ou massives (roches consolidées) **sédimentaires** (calcaires et grès), **éruptives** ou **métamorphiques** (ardoises, granites, porphyres, gneiss, amphibolites, quartzites, schistes, basaltes, etc.).

Il faut différencier entre le terme « Carrière » et le terme « Mine ».

Une **carrière** c'est tout gisement dont on extrait des matériaux pour BTP et Minéraux industriels (non métalliques) alors qu'une **Mine** désigne tout gisement dont on extrait des métaux natifs ou imprégnés dans les minerais, et les produits combustibles.

#### **Il s'agit de mines si les roches extraites contiennent :**

- des combustibles fossiles (houille, anthracite, lignite, hydrocarbures liquides ou gazeux...).

- Des sels de sodium (sel gemme ou halite) ou de potassium (sylvite).
- Des métaux (fer, plomb, zinc, étain, cobalt, cuivre, argent, or...).
- Des éléments radioactifs (uranium...).
- Du soufre, sélénium, tellure, arsenic, antimoine, bismuth...
- Du gaz carbonique.

**Tous les autres gisements constituent des carrières :**

- L'ocre
- Les sables
- L'argile
- La pierre de taille
- L'ardoise
- Le calcaire
- Le gypse
- La barytine ... (Un cas particulier : la barytine - ou le baryum - ne sont pas des matières concessibles au sens strict du terme, néanmoins dans l'usage courant on nomme "mines de barytine" les exploitations, alors que selon la législation ce sont des carrières...)

## Chapitre II

# CLASSIFICATION DES CARRIERES

On peut classer les carrières selon plusieurs critères.

### **I/ TYPES DES CARRIERES SELON L'ETAT DES MATERIAUX EXTRAITS**

#### **1- Carrières de roches massives**

Ce sont les Carrières qui exploitent les roches massives siliceuses ou silicatées regroupées sous le vocabulaire restrictif «d'éruptives ». L'origine de ces roches peut être lié au refroidissement de magmas issus des couches internes du globe (granites, diorites, basaltes, de la transformation dans les profondeurs de la croûte terrestres de roches d'origines plus superficielles (gneiss, quartzites, ...) ou de roches sédimentaires comme le calcaires. Dans la plupart des cas, il s'agit de roches dures profondément enracinées sous le sol et d'aspect massif.

Ce type de roche n'affleure que dans des zones géologiques bien définies, qui sont soit les « massifs cristallins », traces d'anciennes montagnes arasées des au cours des ères géologiques, soit les zones volcaniques. De plus, la compacité de ces roches en fait un matériau difficile à travailler, dont l'extraction nécessite le recours aux explosifs.

#### **2- Carrières de roches meubles**

Ce sont les carrières qui exploitent les sédiments à l'état meuble (sables ou graviers) ou granulats alluvionnaires qui tapissent normalement le fond des vallées et le long des fleuves et de leurs affluents. Cette ressource présente un caractère meuble, et donc facile à extraire, comme le gisement de sables et de graviers, en fait logiquement la ressource la plus couramment exploitée.

### III / TYPES DES CARRIERES SELON LA DISPOSITION

#### 1) Carrieres à ciel ouvert

Ce sont les carrières les plus fréquentes. L'extraction s'effectue en gradins (ou fronts de taille) de géométrie, dimension et dispositions diverses selon la géologie du terrain exploité.

#### 2) Carrieres souterraines

L'exploitation s'effectue sous forme de cavités creusées dans le sous-sol pour permettre l'extraction de matériaux de construction (calcaire, craie, argiles, etc.).

*Remarque : Le choix du mode d'exploitation est souvent déterminé par la profondeur du gisement d'où est extraite la pierre de taille. Si la profondeur est importante cela impose le passage de l'extraction à ciel ouvert à l'extraction en galeries souterraines.*

### III / TYPES DES CARRIERES SELON LA DESTINEE DES MATERIAUX EXTRAITS

- Matière première pour la construction :
  - calcaire et Schiste pour les cimenteries, gypse pour le plâtre, argile pour la terre cuite et cimenterie, etc ...
  - Roche ornementale : pierre de taille pour la construction, marbre, granite, ardoise, etc ...
- Granulat : graviers et sables (destiné essentiellement pour le béton)

### IV / TYPES DES CARRIERES SELON MODE D'EXTRACTION

- Carrieres de roche massive : abattage à l'explosif, plus rarement par ripage, voire sciage ;
- Gravière et sablière : extraction de dépôts sédimentaires, alluvionnaires ou marins (sable et gravier).

## Chapitre. III

# PROSPECTION GEOLOGIQUE ET GEOPHYSIQUE ET RECHERCHES DES SUBSTANCES UTILES DU SOUS SOL

### INTRODUCTION

La prospection des gisements ou carrières passe par **4 stades** essentiels :

**STADE A** : Etudes générales : Connaissance globale des ressources au niveau d'une région (Echelle : 1/100 000)

- localisation générale des gisements de matériaux utilisables,
- identification et caractérisation sommaire des différents types de matériaux,
- ordre de grandeur du volume des ressources,
- conditions générales d'exploitation. Etat possible des lieux après exploitation selon les types de gisement.

**STADE B** : Définition de secteurs favorables à l'exploitation en vue de l'approvisionnement d'une zone de consommation : SDAU (*Schéma directeur d'aménagement et d'urbanisme*), Agglomération (Echelle 1/25 000)

- connaissance de la qualité des matériaux,
- études des caractéristiques des gisements (épaisseurs de découverte, de matériau utilisable), zonage des gisements et évaluation des volumes par secteur,
- détermination de la présence d'une nappe phréatique, de ses variations et définition des possibilités d'utilisation des terrains après exploitation,
- acquisition de données permettant une comparaison des coûts des granulats selon les secteurs,
- comparaisons et classement des différents secteurs selon leur intérêt.

**STADE C** : Définition de secteurs en vue de leur exploitation et prévision de leur vocation ultérieure : (Echelle 1/10 000)

- Affinage des connaissances dans certaines zones favorables retenues à la suite de la phase B pour permettre une délimitation précises (à l'échelle retenue dans le **P.O.S. Plan d'Occupation des Sols**) des zones dans lesquelles pourront être ouvertes des carrières.

**STADE D** : Etudes détaillées préparatoires à l'exploitation des gisements : (Echelle 1/1 000 à 1/2 500)

- délimitation exacte du gisement à exploiter, de la cubature des matériaux,
- définition d'un parti d'exploitation et d'aménagement compatible avec la géologie du site,
- définition des méthodes d'exploitation (découverte, matériau) et des mouvements de terre pour la remise en état des sols,
- définition du matériel à employer (exploitation, traitement),
- définition des produits qui pourront être vendus, établissement du bilan économique prévisionnel de l'exploitation.

## **I / PROSPECTION GEOLOGIQUE ET GEOPHYSIQUE**

### **1) Prospection de gisements de roches massives**

a) Etude géologique : Examen des cartes et photos aériennes. Observation des carrières anciennes et en activité. Levé géologique avec échantillonnage sur affleurements et étude pétrographique.

b) Géophysique électrique : Le traîné de résistivité à 2 longueurs de ligne (quelquefois plus) est utilisé le plus souvent. La méthode magnétotellurique en cours d'expérimentation est susceptible de remplacer le traîné. Le sondage électrique peut être utilisé dans certains cas.

c) Sismique réfraction : Elle permet de distinguer : le terrain de surface à faible vitesse de propagation, la roche saine à forte vitesse et un terrain intermédiaire à vitesse

moyenne qu'il n'est pas toujours aisé de définir. La prospection géophysique peut laisser des ambiguïtés mais elle donne une "image" du gisement qui permet d'implanter plus judicieusement les forages.

d) Sondages :

- *Sondage carotté*: précis mais lent et onéreux.
- *Forages destructifs au marteau perforateur*: rapide et peu onéreux. Nécessité d'un suivi attentif permettant notamment de récupérer et identifier poussières et éclats (ces derniers utilisables pour examen pétrographique et essais de fragmentation dynamique) qui permettent l'établissement de la "coupe sondeur".
- *La mesure de la vitesse d'avancement* (par chronométrage ou d'une manière automatique) permet également de différencier les terrains traversés.

e) Diagraphies:

C'est l'enregistrement grâce à des sondes suspendues par un câble de divers paramètres du sous-sol le long d'un trou de forage. Les mesures suivantes peuvent être faites:

- *Radioactivité naturelle* ( $\gamma$ ) même dans un sondage tube
- *Résistivité* (sonde latérolog) dans un sondage non tube rempli d'eau ou de boue
- *Vitesse du son*: base de mesure 20 cm en continu dans un forage rempli d'eau ou 30 à 60 cm point par point dans un forage sec
- *Masse volumique* (sonde  $\gamma\text{-}\gamma$ ) : précision généralement insuffisante
- *Teneur en eau* (sonde neutron-neutron)

En général les mesures de radioactivité naturelle et résistivité suffisent pour faire une discrimination des faciès, préciser la "coupe sondeur" et finalement établir une bonne coupe géologique.

## 2) Prospection des gisements de roches meubles

a) Topographie et stéréoscopie (= analyse des photos aériennes) donnent des indications morphologiques pour situer limites de terrasses, chenaux

b) Géophysique: La méthode du trainé de résistivité est actuellement la plus utilisée, la méthode magnétotellurique devrait être utile également. La sismique réfraction plus rarement employée nécessite que les compacités des terrains, soient bien contrastées.

c) Sondages :

. Sondages rapides: en diamètre généralement faible (<200 mm) ils ne donnent un échantillon représentatif que pour les granularités assez fines mais permettent une bonne définition de la géométrie du gisement (tarière continue, vibrofonçage, tarière simple, tarière avec piège à graves, carottier battu)

. Canne à sonder ou pénétromètre peuvent être utilisés avec une découverte peu compacte.

. Autres sondages: relativement onéreux, ils permettent d'obtenir des échantillons représentatifs (pelle hydraulique, tarières en gros diamètre, trépan benne, soupape).

## II / RECHERCHES DES SUBSTANCES UTILES DU SOUS-SOL

### 1) Définition

Les substances utiles sont les roches ou minéraux utilisés en raison des propriétés physiques (couleur, transparence, dureté, fusibilité, etc ...) qu'ils présentent (exemples: quartz, corindon, argiles, micas, etc ...). On les appelle aussi « **Les Minéraux industriels** ».

Les minéraux industriels (quartz, talc, feldspath, argile, chaux, calcaire, dolomie, gypse, ...) sont des matières premières minérales naturelles indispensables

à la fabrication des produits de la vie quotidienne (bâtiment, véhicule, informatique, médicaments, papier, peinture, plastique, verre, etc.).

**Sont inclus dans les minéraux industriels :**

- les pierres industrielles (calcaire, dolomie, marbre, silice)
- la plupart des minéraux non métalliques;
- certains minéraux métalliques (chromite, ilménite, magnétite, hématite) utilisés sous forme de composés chimiques;
- les argiles;
- les pierres gemmes;
- les saumures.

**Sont exclus des minéraux industriels:**

- la plupart des minéraux métalliques;
- les combustibles;
- les eaux minérales.

On distingue 7 familles de minéraux industriels : **Les silicates, les carbonates, les sulfates, les sulfures, les halogénures et les argiles et oxydes de fer.**

Liste des Minéraux industriels par ordre alphabétique :

AMIANTE / ANATASE / ANDALOUSITE / ANTIMOINE (minéraux d') / APATITE / BASTNAESITE / BADDELEYITE / BARYTINE/MINÉRAUX D'ALUMINIUM/BÉRYLLIUM (minéraux de) / BÉRYL / BRUCITE / CÉLESTITE / CHROMITE / CHRYSOTILE / CORINDON & ÉMERY / DIAMANT/DIATOMITE/DIOPSIDE/FELDSPATH / FLUORINE / GRAPHITE / GRENAT / GYPSE / HALITE / HÉMATITE (SPÉCULARITE) / ILMÉNITE / JADE-NÉPHRITE / KAOLINITE / KYANITE / LÉPIDOLITE / LEUCOXÈNE / LITHIUM (MINÉRAUX DE) MAGNÉSITE / MAGNÉTITE / MAGNÉSIUM (minéraux de) / MANGANÈSE (minéraux de) / MINÉRAUX ARGILEUX / MINÉRAUX DÉCORATIFS / MICA / MONAZITE / MUSCOVITE / NÉPHÉLINE / OCRE / OLIVINE / OXYDE DE FER / PERLITE (roche volcanique) / PYROPHYLLITE / QUARTZ / RUTILE / SERPENTINE / SILLIMANITE / SOUFRE / SPÉCULARITE / SPODUMÈNE / MINÉRAUX DE STRONTIUM / STAUROTIDE / SYLVITE / TALC / TERRES RARES (minéraux de) / TITANE (minéraux de) / TRÉMOLITE / XÉNOTIME-Y / VERMICULITE / WOLLASTONITE / YTTRIUM (minéraux de) / ZÉOLITE (minéraux de) / ZIRCON

**2) Applications industrielles**

- Il y a une grande variété de substances pour des applications très variées.

- Certaines substances peuvent se substituer à d'autres.
- La définition des paramètres « économiques » est souvent complexe.
- Certaines caractéristiques physiques (couleur, absorption, résistance, etc.) peuvent prendre beaucoup d'importance pour la définition économique du gisement.
- Plusieurs minéraux sont difficiles à identifier sur le terrain.
- Les schémas de classification/identification varient d'un pays à l'autre, du milieu géologique au milieu minier et selon leur mise en marché.

Il n'existe pas de consensus sur une classification universelle des minéraux industriels. Le critère peut être axé sur la ressource, son usage, son importance en volume ou sa valeur unitaire.

### ***Considérations spécifiques***

Les gîtes de minéraux industriels sont associés à des contextes ou à des environnements géologiques particuliers. Ceux-ci peuvent être mis en évidence lors de travaux de cartographie géologique ou de prospection. Des travaux d'**exploration** plus avancés tels les forages, les analyses chimiques et même les essais de concentration sont généralement nécessaires pour évaluer le potentiel d'un gisement.

L'exploitation des minéraux industriels fait souvent appel à des procédés d'exploitation et de traitement relativement complexes, ce qui influence grandement l'exploitabilité d'un gisement. Le marché est une autre contrainte importante dont il faut tenir compte. Pour certaines substances le marché est très morcelé, leur vente et leur distribution deviennent donc très complexes. Pour d'autres, le marché est contrôlé par une ou plusieurs entreprises importantes, ce qui laisse peu de place à de nouvelles exploitations. Pour certaines substances très abondantes, c'est la proximité des clients potentiels qui devient le critère le plus important.

Une maison contient jusqu'à 150 tonnes de minéraux, présents dans le ciment (argile, carbonate de calcium), le plâtre (gypse), le verre, la peinture, la céramique, les tuiles et briques (argiles),...

Une voiture contient jusqu'à 150 kilos de minéraux dans les pneumatiques (talc, carbonate de calcium), dans les composants plastiques (talc, carbonate de calcium,

kaolin).Le papier est constitué jusqu'à 50% de minéraux (carbonate de calcium, talc, kaolin, bentonite).

Les peintures sont composées de 50% de minéraux (carbonate de calcium, talc, silice, argile plastique, bentonite, mica).

Les produits céramiques (carrelage) sont constitués de 100% de minéraux (feldspath, argile, kaolin, talc, silice).

Le verre contient 100% de minéraux (silice, feldspath, borate, dolomie, chaux).

On trouve également des minéraux industriels dans d'autres domaines tels que l'aéronautique, le pharmaceutique, la cosmétique, l'électronique, les travaux publics, le traitement de l'eau, l'agriculture, les énergies renouvelables, etc.

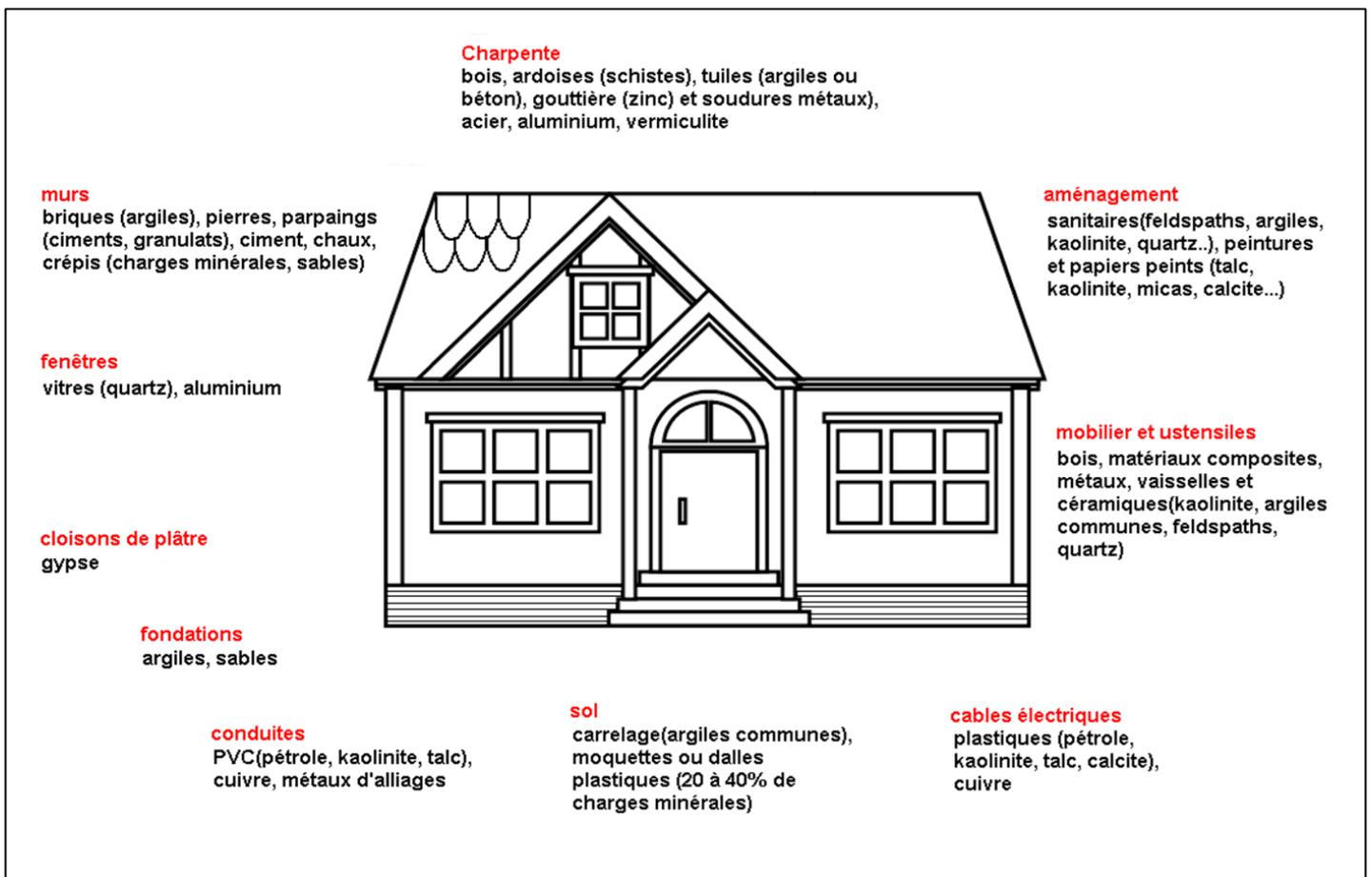


Fig.3- Exemple d'applications des substances utiles

<b>Substance utile</b>	<b>Contexte géologique du gisement</b>
<b>Quartz</b>	Le quartz se présente rarement sous forme de monocristaux en quantité suffisante pour une exploitation industrielle (cas des filons plutoniques ou des géodes). La forme la plus commune se présente en petits cristaux dans divers types de roches ou dans les sables siliceux.
<b>Feldspaths potassique</b>	Le feldspath potassique est minéral commun dans les roches ignées, métamorphiques et sédimentaires détritiques. Le feldspath potassique est un minéral constituant de la plupart des roches intrusives felsiques (1) comme le granite, la syénite, la granodiorite, la rhyolite, la trachyte, et certains porphyres. Dans les roches sédimentaires, le feldspath potassique peut être abondant dans les arkoses.
<b>Plagioclase</b>	Le plagioclase est le minéral le plus abondant de la croûte terrestre, on trouve du plagioclase dans la plupart des roches ignées intrusives, extrusives et métamorphiques. Le plagioclase est relativement moins abondant dans les sédiments et les roches sédimentaires à cause de sa faible résistance à la météorisation.
<b>Muscovite</b>	La muscovite est un minéral abondant et communément constituant des roches ignées. La muscovite est un des minéraux caractéristiques des granites et des pegmatites granitiques. La muscovite se forme également dans les roches métamorphiques et peut être le principal minéral dans certains schistes à mica. La séricite est une variété de muscovite qui se forme durant le métamorphisme rétrograde des feldspaths, topaze, kyanite, spodumène et andalousite.
<b>Biotite</b>	La biotite est un des minéraux constituant des roches plutoniques (granites, diorites, syénites, surtout dans les familles intermédiaires calco-alcalines), des roches métamorphiques (schistes, gneiss et micaschistes), et plus rarement dans les roches volcaniques (rhyolites, dacites, trachytes, andésites). Son altération la transforme en chlorite. Comme ce minéral est peu résistant à la météorisation, il n'est jamais présent en abondance dans les roches sédimentaires.
<b>Amphibole</b>	Très largement répandues dans la nature, elles sont généralement de couleur sombre, mais peuvent varier du blanc au noir. En général, ce sont des minéraux durs et lourds. Ils entrent en partie dans la constitution des roches magmatiques et métamorphiques. Certaines roches appelées amphibolites sont constituées presque entièrement d'amphiboles.
<b>Pyroxène</b>	Ce sont des composants courants des roches ignées et métamorphiques
<b>Olivine</b>	L'olivine est un minéral constituant ou accessoire des roches ignées mafiques comme les gabbros, basaltes et péridotites, en association avec le plagioclase et le pyroxène. L'olivine peut également se former dans les roches métamorphiques comme le marbre. Les olivines sont les premiers produits de cristallisation (magmas riches en fer et Mg et pauvres en silice). Lors de l'altération olivine = serpentines (amiante blanche).

<b>Grenats</b>	Les grenats sont les minéraux constituant de certaines roches métamorphiques et les minéraux accessoires de certaines roches ignées.
<b>Carbonates</b>	Dépôts sédimentaires
<b>Sulfates</b>	De nombreux sulfates sont des constituants habituels de séries continentales ou marines particulières, correspondant à des bassins endoréiques ou à des mers épicontinentales des zones climatiques arides. Dans les séquences d'« évaporites », les sulfates apparaissent avant les dépôts de sel gemme.
<b>Halogénures</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Fluorine</b> : minéral commun et particulièrement abondant dans les veines hydrothermales où il fait office de gangue pour des minéralisations de plomb et d'argent. la fluorine peut se former dans les roches sédimentaires carbonatées (calcaire et dolomie). La fluorine est un minéral accessoire mineur dans certaines roches ignées ;</li> <li>- <b>Sel gemme (halite)</b> : L'halite est un composant de nombreuses roches évaporitiques, provenant de l'évaporation de lacs ou mers salés.</li> </ul>
<b>Argiles</b>	Dépôts sédimentaires

Substance / Minérale	Usages
Apatite [P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ]	Fertilisant agricole / détergent / nourriture pour animaux / produit de boisson
Barytine [BaSO <sub>4</sub> ]	Peinture / Papier / Textile / additif de boue de forage / radiologie
Calcaire / Marbre calcitique [CaCO <sub>3</sub> ]	Chaux / ciment / plastique / peinture
Diamant [C]	Scies industrielles / abrasifs / polissage
Dolomie / Marbre dolomitique [CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ]	Amendements des terres agricoles / Fondant en sidérurgie / Briques réfractaires / Verre
Feldspath <b>NH,K,Na,Ca,Ba</b> <sub>4</sub> (Al,B,Si) <sub>4</sub> O <sub>8</sub>	Céramique / Porcelaine / Verre
Graphite [C]	Mines de crayons / piles alcalines / Batteries
Grenat X <sup>2+</sup> 3Y <sup>3+</sup> 2[SiO <sub>4</sub> <sup>4-</sup> ] <sub>3</sub> .	Produits abrasifs
Kaolin Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	Charge minérale / peinture / céramique / plastique / papier
Lithium (Spodumène LiAlSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub> )	Batteries / Piles alcalines / verre / céramique / médicaments antidépresseurs
Muscovite <b>KAl</b> <sub>2</sub> (AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> )(OH, <b>F</b> ) <sub>2</sub>	Isolant électrique / peinture / papier
Quartz (SiO <sub>2</sub> )	Verre / carbure de silice (cellules photovoltaïques) / fondant / stabilisant
Sillimanite / Kyanite / Andalousite (63,1% d'Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Cimenteries / briques réfractaires / incinérateurs / aciéries
Talc Mg <sub>3</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	Produits cosmétiques / poudre pour bébé

## CHAPITRE IV

---

### LES ESSAIS CHIMIQUES ET PHYSICO-MECANIQUES SUR PIERRES NATURELLES

#### INTRODUCTION

Pour répondre aux objectifs concernant n'importe quelle étude de terrain, soit à construire ou à aménager, il est essentiel d'analyser le matériel échantillonné pour une utilisation adéquate. Après la reconnaissance et l'identification de la roche mère, un prélèvement d'échantillonnage des différentes tranchées d'exploitation du front de taille de la carrière. Après la transmission de ces échantillons au laboratoire, de différentes analyses pourraient être effectuées pour examiner les caractéristiques de ces granulats.

#### 1) LES ANALYSES CHIMIQUES

##### a) L'analyse pétrographique

Cette analyse concernant des échantillons destinés comme matériaux de construction est basée sur des observations microscopiques des lames minces confectionnées à partir de ces échantillons mêmes. L'analyse consiste à identifier la nature des éléments figurés quand ils existent et la nature de la phase de liaison ; la texture et la présence éventuelle des veines diagénétiques.

##### b) L'analyse minéralogique

- **DRX** : C'est une technique non destructive, utilisée pour la détermination de la structure en monocristaux et l'analyse qualitative et quantitative des phases minérales. Des échantillons (roche totale et fraction argileuse) sont analysés par un diffractomètre à anticathode de cuivre avec  $\lambda=1,541 \text{ \AA}$  équipé d'un détecteur. Ce dispositif est piloté par un logiciel X'Pert Pro MPD de Panalytical, destiné à l'identification et l'étude des échantillons polycristallins (pulvérulents ou massifs) et un autre logiciel (OriginPro8) pour représenter les graphes.

Pour la roche totale, les mesures sont réalisées sur des préparations désorientées sur support en quartz monocristallin. L'estimation semi-quantitative du

cortège minéralogique est obtenue en mesurant les hauteurs des pics principaux des minéraux sur les spectres des échantillons bruts.

Pour la fraction argileuse, les mesures ont été effectuées sur des lames avec dépôt orienté par sédimentation de l'échantillon. Cette analyse, fondée sur la loi de Stokes, se fait après attaque par l'acide chlorhydrique et par l'eau oxygénée, suivant le protocole de Thierry Holtzapffel (1985) d'extraction et de dépôt de la phase extraite (pate orientée).

- **ICP-AES** : Il s'agit de la Spectrométrie d'Émission Atomique Source Plasma à Couplage Inductif (ICP-AES). Elle est basée sur l'ionisation de l'échantillon grâce à une source d'énergie, qui est le plasma (Kogel et Lewis, 2001) dont l'objectif est de quantifier la teneur des éléments chimiques avec une faible limite de détection et une bonne précision des échantillons, ainsi que l'établissement des relations qui existent entre la silice, les oxydes et la teneur des éléments en traces.

**c) La calcimétrie** : Cette analyse détermine la teneur en carbonates des échantillons par le calcimètre de Bernard. En effet, le volume de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), produit par l'action de l'acide chlorhydrique (HCl) sur une masse déterminée de matériel, permet la détermination de la quantité du carbonate ayant réagi. Les échantillons ont été préalablement homogénéisés et broyés de manière à obtenir une poudre très fine. L'acide chlorhydrique (HCl 50%) est rajouté à 0,2 g de poudre pour activer la réaction :



La variation du volume, qu'on peut lire directement sur la graduation du calcimètre est proportionnelle au volume du CO<sub>2</sub> dégagé. La même attaque est réalisée, trois fois pour chaque échantillon afin d'avoir une moyenne (V<sub>éch</sub>) et deux fois pour l'étalon de calcite pure qui nous donne le volume du carbonate dans l'échantillon en utilisant la relation suivante :

$$\% \text{CaCO}_3 = \left( \frac{V_{éch}}{V_{étal}} \right) \times 100$$

**d) La perte au feu** : Les essais de perte au feu ont été réalisés sur un échantillon séché, à 105°C jusqu'à atteindre une masse constante. Pour la détermination de la matière organique, la température de cuisson est fixée à 450°C et 550°C dans un four (NF P94-047 et NF EN 12879).

e) **Le pH** : Les mesures du pH sont faites à l'aide d'un pH-mètre électronique, sur des échantillons bruts, trempé dans l'eau distillé pendant quatre heures.

## 2) LES ANALYSES PHYSICO-MECANIKUES

Ces analyses s'effectuent à partir de fragments concassés ou broyés des matériaux exploités, afin de caractériser, de contrôler et de classer les matériaux selon leurs utilisations adéquates au domaine de Bâtiment et travaux public (BTP). Elles sont effectuées au laboratoire dont les protocoles adoptés suivent des normes nationales ou internationales (française, marocaine ou européenne).

### a) Les analyses physiques

**a1. L'analyse morphoscopique** : réalisée à l'aide de la loupe binoculaire avec un grossissement (X20), sur la fraction légère (0,250 - 0.160 mm). L'objectif de cette étude est de caractériser la forme des grains de quartz et la provenance de sables.

**a2. La granulométrie** : C'est un paramètre qui détermine la classification des matériaux de construction. Cette analyse permet d'avoir un matériau en plusieurs classes granulaires à l'aide d'une série de tamis normalisés. Elle existe la granulométrie par tamisage des granulats secs (NF P 94-056) ou par sédimentométrie pour quantifier les diamètres des grains inférieurs à 80µm.

**a3. La densité**, est le rapport de sa masse volumique à la masse volumique d'un corps pris comme référence. La densité, notée **d**, s'exprime de la sorte :

$$d = \rho_{corps} / \rho_{ref}$$

où

$\rho_{corps}$  est la masse volumique du corps considéré

$\rho_{ref}$  est la masse volumique du corps de référence.

**a4. La porosité**, est la propriété d'un matériau qui contient des pores ou cavités de petite taille et pouvant contenir des fluides (liquide ou gaz). Elle est définie comme le rapport entre le volume des vides (**Vv**) et le volume total d'un milieu

poreux (**Vt**) : 
$$P = \frac{Vv}{Vt}$$

L'objectif de la densité et de la porosité est de déterminer les paramètres pétrophysiques des granulats.

**a.5. La plasticité**, qui correspond à des phases de transitions particulières de la consistance d'un sol, sous l'action des variations hydriques (NF P 94-051). L'appareil de Casagrande, pour savoir les limites de plasticité d'Atterberg ;

**a.6. La valeur du bleu de méthylène (VBs)**, L'essai au bleu de méthylène, également appelé « *essai au bleu* », est un essai utilisé en géotechnique pour déterminer la propreté d'un sable, d'un granulat et plus généralement d'un sol, et les différents types d'argiles qu'il contient. Le bleu de méthylène est en effet adsorbé préférentiellement par les argiles du type montmorillonites (argiles gonflantes) et les matières organiques. Les autres argiles (Illites et Kaolinites) sont peu sensibles au bleu. L'essai consiste à mesurer la quantité de colorant (bleu de méthylène) fixée par 100 g de la fraction granulaire analysée

**a.7. La propreté**, qui identifie les éléments inférieurs à 80 $\mu$  indésirables, dans le granulat. Ce sont soit des fines plastiques naturelles (argiles), soit des fines plastiques dues au concassage des roches. L'échantillon a été lavé puis mis à l'étuve jusqu'à 24 heures, ensuite il a été pesé et tamisé au tamis de 0,5 mm.

- Pour les fines qui adhèrent à la surface des gravillons, on calcule le pourcentage des éléments fins après lavage (propreté superficielle, NF P 18-591) ;
- Pour les sables, on utilise l'équivalent de sable, qui permet d'apprécier la quantité des particules argileuses ou limoneuses dans un sable (NF P 18-598).

### **b) Les analyses mécaniques**

Ces analyses permettent de déterminer les paramètres d'usure des matériaux. Elle s'effectue par plusieurs essais :

- **ESSAI LOS ANGELES**, permet de mesurer les résistances combinées aux chocs et à la détérioration progressive par frottement réciproques des éléments d'un granulat. Ce mode opératoire s'applique aux granulats utilisés pour la constitution des chaussées et bétons hydrauliques.

La norme européenne EN 1097-2 décrit l'essai Los Angeles. Il consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6 mm produite en soumettant le matériau

aux chocs de boulets et aux frottements réciproques de la machine Los Angeles pour cela il évolue pendant l'essai. La granularité du matériau soumis à l'essai est choisie parmi six classes granulaires qui sont :

4/6,3 mm

6,3/10 mm

10/14 mm

10/25 mm

16/31,5 mm

25/50 mm

Si **M** est la masse du matériau soumis à l'essai, **M1** est la masse des éléments supérieurs à 1,6 mm produits au cours de l'essai qui est égouttée et séchée à l'étuve jusqu'à poids constant. On définit alors le coefficient Los Angeles **LA** qui est un pourcentage en masse du rapport des éléments passant aux tamis de 1,6 et la masse initiale sèche.

$$LA = 100 \times (M - M1) / M$$

**LA** : c'est la résistance à la fragmentation par chocs et par frottements réciproques des éléments des granulats.

- **ESSAI MICRO-DEVAL**, permet de mesurer *la résistance à l'usure par frottement des matériaux*. La prise d'essai est constituée par 500 g, d'une classe granulaire de 4-6,3mm; 6,3-10 mm; 10-14 mm; 25-50 mm. Si **M** la masse du matériau soumis à l'essai et **m** la masse des éléments inférieurs à 1,6 mm produits au cours de l'essai. La norme européenne EN 1097-1 permet de déterminer le coefficient de micro-Deval comme suit :

$$C_{MD} = 100 * (m/M)$$