

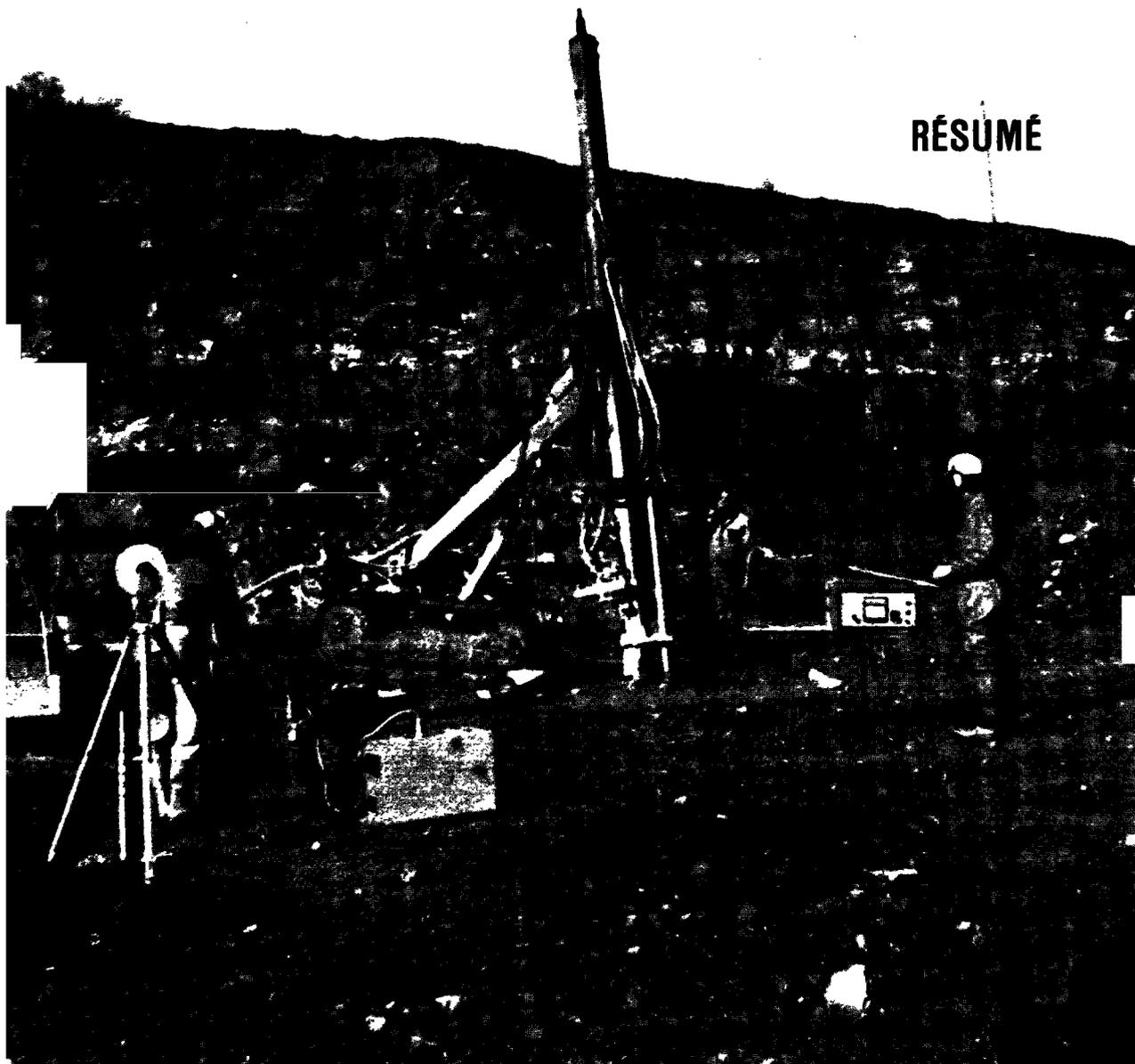
JR

COMITÉ DE GESTION DE LA TAXE PARAFISCALE SUR LES GRANULATS

MÉTHODOLOGIE DES ÉTUDES DE RESSOURCES EN GRANULATS

(14.EG.45)

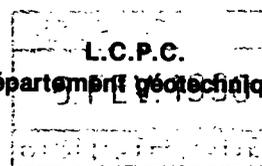
RÉSUMÉ



B.R.G.M.
Département matériaux

L.C.P.C.
Département géotechnique

79 SGN 577 MTX



COMITÉ DE GESTION DE LA TAXE PARAFISCALE SUR LES GRANULATS

**MÉTHODOLOGIE DES ÉTUDES DE RESSOURCES
EN GRANULATS**

(14.EG.45)

RÉSUMÉ

par

Y.BERTON (*B.R.G.M.*) - L. PRIMEL (*L.C.P.C.*)

B.R.G.M.
Département matériaux
B.P. 6009
45060 ORLÉANS Cédex

L.C.P.C.
Département géotechnique
58, boulevard Lefebvre
75015 PARIS

79 SGN 577 MTX

L.C.P.C. 35

1. INTRODUCTION

Le but du présent travail est de cerner les motivations et objectifs des études de ressources en granulats, de définir les méthodes à employer et la densité des observations à effectuer pour réaliser ces études de ressources compte tenu des objectifs à atteindre et des caractéristiques des gisements.

Les études de ressources constituent l'un des volets des études nécessaires à l'approvisionnement en granulats. Elles doivent s'accompagner de l'étude des besoins, des contraintes pesant sur les gisements et peuvent être assorties d'études de valorisation, de transport etc...

2. GENERALITES

2.1. Motivation

La motivation des études de ressources en granulats est la satisfaction des besoins de ces matériaux, l'aménagement de l'espace en vue du choix rationnel des sites adoptés pour l'implantation des carrières, la prévision de l'utilisation de ces sites après l'exploitation et de l'impact des carrières sur l'environnement.

2.2. Utilisateurs des études de ressources

- Les carrières,
- les Services des Mines responsables des problèmes d'approvisionnement en matériaux et de la gestion des carrières,
- les Services de l'Équipement en tant que consommateurs de matériaux et responsables de l'Aménagement de l'espace,
- les collectivités et missions d'aménagement,
- des utilisateurs divers: responsables des problèmes d'environnement, responsables des infrastructures de transport, etc...

2.3. Types de matériaux à étudier

Tous les types de roches ou de matériaux susceptibles de fournir des granulats et notamment:

Granulats meubles: alluvions fluviatiles, formations d'origine glaciaire, formations de pente (éboulis, colluvions, produits de solifluxion) sables éoliens, formations résiduelles, formation sablo-graveleuses marines (anciennes et actuelles), matériaux provenant de terrils.

Granulats issus de roches massives : Calcaires - Roches éruptives et cristallophylliennes.

2.4. Objectifs généraux et différents types d'études de ressources

Les objectifs peuvent varier selon la motivation de l'étude. Cependant, les études sur fonds publics doivent apporter au minimum une réponse aux points essentiels suivants qui intéressent la collectivité :

- localisation des gisements exploitables de granulats,
- appréciation qualitative et quantitative des matériaux qu'ils renferment,
- conditions possibles d'exploitation des gisements,
- état prévisible des sites à l'issue de l'exploitation des gisements,
- conséquences de l'exploitation sur le milieu.

L'inventaire des ressources en granulats doit être effectué par phases successives de plus en plus précises, réalisées en parallèle avec l'étude des autres données concernant les possibilités d'exploitation.

2.5. Objectifs des études de ressources aux différents niveaux de précisions

(Voir aussi tableau ci-contre)

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, 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.

CADRE GENERAL DES ETUDES EN VUE DE L'EXPLOITATION DES GISEMENTS DE GRANULATS

PHASES	ECHELLE ET CADRE DE REFERENCE	ETUDES DE RESSOURCES			AUTRES ETUDES A MENER EN PARALLELE AVEC LES ETUDES DE RESSOURCES			
		OBJECTIFS	CONTENU	METHODES	ECONOMIQUES	TECHNIQUES	D'ENVIRONNEMENT	D'AMENAGEMENT
A	1/100 000 ou plus petit milliers de km ² (département)	- cadrage - définition de zones de ressources - études de substitution	- Localisation générale des différents types de gisements. - Caractérisation sommaire des qualités et utilisations possibles. - Ordre de grandeur des volumes possibles.	- Synthèse de la documentation existante. - Utilisation de moyens légers (géologie, morphologie) - Echantillonnage essais de laboratoire principalement sur matériaux peu connus, non exploités.	ETUDE DES BESOINS	- Etude de valorisation	- Cadrage - Repérage des problèmes majeurs (consultations)	
B	1/25 000 dizaines à centaine de km ² . SDAU ou équivalent.	- Orientation des choix. - Définition des priorités relatives d'affectation des zones exploitables.	- Définition des zones favorables à l'exploitation. - Identification des différents secteurs: qualités, volumes de matériaux, conditions de gisement.	- Géophysique pour cerner les zones les plus favorables. - Sondages pour étude de la géométrie des gisements et échantillonnage. - Essais géotechniques.		- Etudes de faisabilité: valorisation, transport	- Recensement des contraintes réglementaires et des contraintes majeures d'environnement. - Repérage des conflits existants ou éventuels . milieu . activités . paysage	- Elaboration de schémas directeurs (SDAU...)
C	1/10 000 quelques km ² P. O. S.	- Définition des zones préférentielles d'exploitation pour permettre à l'autorité politique d'arrêter des choix.	- Délimitation des secteurs exploitables. - Caractérisation des matériaux dans les secteurs exploitables (qualités-quantités). - Prévision des conditions d'exploitation-remise en état.	id. phase B mais densité d'observations et de mesures plus importantes.			- Affinement des études de certains milieux. - Définition de la relativité des contraintes.	- Affectation des sols (P. O. S.) - Définition de zones Article 109-1
D	ZONE ARTICLE 109-1 1/1000 à 1/22500 dizaines à centaine d'ha. Zone à exploiter.	- Définitions des moyens à mettre en oeuvre pour l'exploitation-remise en état des sols.	- Définition des conditions d'exploitation, de traitement des matériaux, de remise en état des sols. - Définition quantitative et qualitative des matériaux commercialisables.	- Compléments de topographie. - Systématisation des mesures géophysique, des sondages et des essais de laboratoire.	- Etude de coût d'exploitation et de traitement.	- Etude de matériel d'exploitation et de traitement.	- Etude d'impact	- Plan de remise en état des sols. - Plan de réaménagement.

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.) 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.

2.6. Différents types de gisements à étudier

Il est souhaitable de prendre en compte, dans les études de ressources en granulats, les différents types de roches susceptibles de fournir ces matériaux : roches meubles (alluvions, matériaux glaciaires, sables et graviers d'origine diverse), roches massives (calcaires, éruptives, cristallophylliennes) ainsi que, éventuellement, les matériaux de terrils.

2.7. Etudes de contraintes

Les études de ressources indiquent les possibilités techniques d'exploitation des granulats. Il y aura lieu de tenir compte aussi de critères externes : contraintes d'occupation des sols et d'environnement, coûts des terrains, de l'exploitation et du traitement des matériaux, du transport.

3. METHODES DE PROSPECTION

3.1. Prospection de gisements de roches massives :

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

. 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.

. 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 (γ) même dans un sondage tubé
- Résistivité (sonde latérolog) dans un sondage non tubé 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 γ - γ): 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.

. Essais et identifications:

L'identification comporte: l'étude pétrographique en lames minces les mesures de masse volumique apparente et de porosité, l'analyse chimique simplifiée pour les carbonates.

Les essais mécaniques: Los Angeles et fragmentation dynamique Microdeval en présence d'eau principalement.

3.2. Prospection de gisement de roches meubles:

- Topographie précise et photographies aériennes donnent des indications morphologiques pour situer limites de terrasses, chenaux.....
- Géophysique: La méthode du trainé de résistivité est actuellement la plus utilisée, la méthode magnétotellurique devrait être utile également. La sismique réflexion plus rarement employée nécessite que les complicités des terrains soient bien contrastées.

- 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 type Highway, 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 Benoto, soupape).

- Essais et identifications:

- . Granularité: sur tamis entre 50 μ et 20 mm lorsque $D > 20$ mm; les échantillons pour être représentatifs doivent être très volumineux (une partie du tamisage est à faire sur le terrain)
- . Petrographie-Minéralogie: Examen à l'oeil et à la loupe bino-culaire à effectuer sur les différentes tranches granulaires complété éventuellement par l'examen au microscope polarisant (comptages à effectuer sur 200 éléments par classe granulaire)
- . Essais mécaniques: les mêmes que ci-dessus (Roches massives) s'y ajoute un essai de friabilité pour les sables.
- . Propreté : évaluée par la granulométrie des fines (densimètre, méthode "à la pipette, granulomètre à laser) L'équivalent de sable et le nouvel essai au bleu de méthylène permettent d'apprécier à la fois la quantité et la "nocivité" des fines. Ces méthodes peuvent être complétées par l'identification des fines aux rayons X.
- . Autres essais possibles: dosage des matières organiques, sulfures...

4. MOYENS A METTRE EN OEUVRE AUX DIFFERENTS NIVEAUX D'ETUDE:

3 niveaux peuvent être distingués:

- niveau général: études du stade A (échelle $\sim 1/100\ 000$)

- niveau moyen:

[	études d'orientation (-stade B): échelle $\sim 1/25\ 000$
]	études en vue du choix des zones à exploiter (stade C) échelle $\sim 1/10\ 000$
]	les deux stades se différencient essentiellement par la maille des travaux à effectuer.

- niveau détaillé (stade D) préparatoire à l'exploitation.

4.1. Niveau général:

- Compilation des données existantes: cartes géologiques, bibliographie, inventaire des sondages.
- Etude géologique: reconnaissance de l'origine des granulats alluvionnaires.
 - . Pour les formations sédimentaires: reconstitution paléogéographique
 - . Pour les roches magmatiques: différenciations pétrographiques
- Etude morphologique: sur le terrain et sur photos aériennes
- Etude de terrain: observation des affleurements naturels et dans les carrières en activité ou anciennes.
 - . Matériaux alluvionnaires: Reconnaissance des types de gisement (gisements de méandre, de remblaiement); l'identification minéralogique et pétrographique est primordiale à cette échelle; elle doit s'accompagner d'essais mécaniques (Los Angeles - Microdeval en présence d'eau) avec éventuellement essais de porosité (sur calcaires) coefficient de polissage accéléré, mesures de teneurs en matière organique, sulfures. Les essais mécaniques ne seront réalisés que lorsque des changements significatifs interviennent dans la pétrographie.
- Pour les roches massives:
Cartographie des faciès pétrographiques et évaluation de l'altération en ce qui concerne les roches magmatiques avec échantillonnage, identification pétrographique et essais mécaniques sur les faciès les plus sains (Los Angeles, Microdeval en présence d'eau, masse volumique, porosité, coefficient de polissage accéléré).

4.2. Niveau moyen:

4.2.1. Gisements alluvionnaires:

- a) Première phase d'intervention: (commune aux études de stade B et de stade C)
similaire et en complément des études générales en procédant à un ratissage systématique de tous les indices.
Elle doit aboutir à la mise en évidence de l'évolution du matériau, de sa nature et granularité, des conditions de gisement (découverte, grave, substratum), de la position et des fluctuations de la nappe phréatique et au choix des méthodes de prospection à utiliser dans la phase suivante.
- b) Seconde phase d'intervention:
 - . élimination du champ de l'étude des zones franchement défavorables.
 - . utilisation de la géophysique électrique: en particulier trainé de résistivité à 2 longueurs de ligne maille:
100 x 200 m à 50 x 100 m pour études à 1/25 000
50 x 100 m à 25 x 50 m pour études à 1/10 000
en cas de découverte faible ou mal contrastée électriquement, la résistivité avec faible longueur de ligne sera remplacée par des sondages à la tarière à main.

- . Sondages: méthode et densité varient en fonction de l'hétérogénéité indiquée par la géophysique, granularité du matériau, épaisseur à prospecter, cote de la nappe, on utilise presque exclusivement les sondages rapides (voir en 3-2) sur les profils perpendiculaires à l'allongement des structures maille indicative: à 1/25 000 - 1 sondage pour 5 ha (100 x 300 m à 200 x 500 m)
à 1/10 000: 1 sondage pour 2 ha (50 x 200 m à 100 x 400 m)
éventuellement, les prélèvements pour identifications et essais géotechniques ne concerneront pas la totalité des sondages.
- . Résultats: on obtiendra:
 - l'épaisseur (G) des matériaux, celle de la découverte (D)
 - un étalonnage de la géophysique permettant de confirmer le zonage établi à partir de la méthode utilisée.
 - la proportion du gisement à sec et en eau
 - une appréciation de la qualité des matériaux grâce aux essais réalisés (granulométries et équivalents de sables, analyses pétrographiques et essais mécaniques sur les mêmes échantillons.

En plus de la présentation des données brutes, il est utile d'exprimer un classement des gisements en fonction de critères à définir cas par cas (d'après la valeur de G, de D, de G/D, de la granularité...par exemple) et de le représenter cartographiquement ce qui permet son utilisation plus facile par l'aménageur.

4.2.2. Gisements de roches massives:

Paramètres à étudier

- la découverte: importance et nature. Ce peut être un niveau différent (cas des gisements calcaires) ou un matériau d'altération
- le matériau exploitable: il faut reconnaître son volume sa nature et ses caractéristiques: fragmentation, distribution des pollutions.
Pour les calcaires (et les roches stratifiées) ceci revient à connaître la structure du gisement (pendages, variations latérales de faciès, cassures qui peuvent être à l'origine de pollutions, failles qui peuvent supprimer la prolongation du gisement).
Pour les roches magmatiques, l'étude de la structure est moins immédiate. On étudiera les filons (souvent de nature différente), les diaclases, failles et zones broyées qui peuvent être à l'origine d'altérations profondes et de pollution du gisement.
- Moyens à utiliser: a) Echelle 1/25 000 - stade B
 - . Etude géologique: (voir études générales) elle permettra de circonscrire les zones sur lesquelles porteront les travaux ci-après.

- . Géophysique de surface:
Trainés de résistivité essentiellement ou méthode magnéto-tellurique artificielle ou sondages électriques (maille 100 x 50 ou 50 x 50) pour les granulats à béton et si le matériau peut être lavé, l'étude pourra s'arrêter à ce niveau (la nature du matériau étant déjà connue par ailleurs).
- . Sondages carottés: 1 par site à cause de son coût, dans une zone de faible découverte. Il servira à une identification précise et à des essais mécaniques sur les roches carottées et permettra le choix des sondes de diagraphie les mieux adaptées au site
 - ° sur toute l'épaisseur de la série intéressante pour les roches stratifiées (calcaires, quartzites...)
 - ° sur une vingtaine de mètres dans des roches magmatiques homogènes.
- . Sondages destructifs complétés par des diagraphies
maille: 1 pour 5 ha (sites homogènes) à 1 pour 2 ha pour les sites complexes (Roches faillées - nombreux filons)
ils permettront de prévoir la structure du gisement -
maille variable : 1 pour 5 ha à 1 par ha.
b) Echelle 1/10 000 - stade C

Les travaux consisteront à lever les incertitudes pouvant subsister dans certaines zones en resserrant la maille de la géophysique et en effectuant quelques sondages destructifs complémentaires.

4.2.3. Conclusion pour les études au niveau moyen:

Les méthodes à utiliser sont bien connues mais la maille de mesure est difficile à prévoir a priori car elle dépend:

- des connaissances géologiques acquises avant l'opération
- de la complexité des gisements et de la taille réelle du corps géologique qui sera étudié (après élimination des zones défavorables)

Il apparaît nécessaire, pour ces études de prévoir une certaine souplesse dans l'importance des moyens à utiliser.

4. 3. Etude détaillée d'un gisement

4.3.1. Gisements alluvionnaires:

1^{re} phase: Détermination des paramètres géométriques détaillés du gisement

- Topographie
- Géophysique: Trainés de résistivité serrés (25 x 25m ou 20 x 20 m) avec petite longueur de ligne (étude de la découverte)
- Sondages mécaniques rapides sur l'épaisseur du gisement maille 50 x 100 m à 100 x 100 m

- Résultats: Etablissement de cartes topographiques du toit et du mur du gisement, des cartes isopaques de la découverte et du matériau sablo-graveleux, et des isobathes de la nappe phréatique éventuellement. Ceci permet de calculer les cubatures des matériaux exploitables et de la découverte, de prévoir les conditions d'enlèvement de la découverte, les modes d'extraction possibles et les partis d'aménagement réalisables.

2° Phase: Détermination des paramètres qualitatifs détaillés du gisement

- . géophysique: Trainés de résistivité serrés (25 x 25 ou 20 x 20 m) à grande longueur de ligne: étude de la pollution du gisement.
- . sondages lourds: sur profils perpendiculaires aux axes d'allongement de l'alluvionnement:
maille: 1 sondage/ha à 1 sondage/ 10 ha
dans les types de gisement bien connus, ces sondages ne sont pas utiles.
- . essais: étude détaillée de la granularité et de la pollution (propreté) du gisement.
Eventuellement si ces travaux n'ont pas déjà été faits: études pétrographiques et essais mécaniques
- . Résultats: Carte isopaque de l'argile intercalaire, carte d'isoteneur en fraction sable 0-5 mm.
Rapport d'étude sur la granularité, la propreté et les caractéristiques des granulats.

4.3.2. Gisements de roches massives

Si la zone étudiée a été reconnue à 1/25 000 et 1/10 000 on procède directement à la réalisation de sondages complémentaires 1 ou 2 sondages carottés par site, sondages destructifs + diagraphies: aboutir au minimum à 1 sondage par hectare;

Si la zone étudiée n'a pas été reconnue au préalable,

- reconnaître la découverte et le sommet du gisement par:
 - . trainés de résistivité: pas de 30 m, lignes espacées de 20 à 50 m.
 - . et/ou sismique réfraction: 5 à 10 mesures par hectare

Procéder ensuite à l'étude par sondages comme indiqué ci-dessus.

5. COUT DES ETUDES DE RESSOURCES EN GRANULATS: (évaluation 1979)

5.1. Coûts élémentaires: (voir annexe 1)

5.2. Coûts des différents types d'étude: (voir annexes 2 à 8.)

Bien que les relations ne soient pas nécessairement simples entre coût des études et superficie étudiée ou volume de matériau reconnu, il est commode, pour fixer les idées de tenter un rapprochement .

Pour des gisements d'alluvions d'une dizaine de mètres de puissance ou des roches massives de 20 à 30 m d'épaisseur utile les ordres de grandeur de coût, rapportés au kilomètre carré étudié sont les suivants :

Etudes générales : niveau A, 130 F

Etudes au niveau moyen :

Stade B (définition de zones favorables) - échelle 1/ 25 000

- en considérant la surface totale étudiée : 10 000 à 40 000 F

- en considérant seulement la surface étudiée en détail :

100 000 à 500 000 F (1)

Stade C (choix de zones favorables) - échelle 1/10 000, surcoût par rapport aux études du stade B.

- pour la surface étudiée en détail : 60 000 à 200 000 F (1)

Etudes détaillées de gisement (stade D) sur des zones déjà reconnues à 1/25 000 : 500 000 à 1 200 000 F (1).

Ramenés au mètre-cube de matériau exploitable reconnu, les coûts seraient les suivants :

Etudes au niveau moyen :

Stade B (1/25 000) : 1,3 à 2 centimes/m³

Stade C (1/10 000), surcoût par rapport au stade B :

1 à 1,5 centimes/m³

Etudes détaillées de gisement (stade D) :

4 à 9 centimes /m³

5. 3. Coût des études déjà financées par la taxe parafiscale sur les granulats

Les études déjà financées par la taxe parafiscale sur les granulats sont soit des études générales (coût au km² compris entre 75 et 1 750 F) soit des études au niveau moyen (coût au kilomètre carré compris entre 2 200 et 30 000 F - en moyenne 8 000 F) mais la définition des zones favorables reste souvent assez peu précise.

(1) coût habituellement évalué par hectare.

5. 4. Optimisation de l'emploi des moyens financiers dans l'inventaire des ressources en granulats :

Les études de ressources doivent avoir une précision compatible avec l'objectif à atteindre. Pour l'évaluation globale de la ressource, des études peu détaillées pourront quelquefois suffire mais lorsqu'il s'agit d'aménagement du territoire, une précision plus grande est requise.

En général, on doit demander aux études de ressources de circonscrire des zones favorables.

Pour la définition de zones à affecter aux carrières, il est préférable de combiner les études de ressources, de contraintes et d'aménagement de sorte que certains arbitrages puissent intervenir en cours d'étude.

Données sur les coûts élémentaires
Tarifs pratiqués en janvier 1979

(Coûts présentés à titre indicatif)

Personnel :

Ingénieur confirmé :.....	1 700 à 1 900 F
Ingénieur d'étude :.....	1 400 à 1 500 F
Technicien supérieur :	1 100 à 1 200 F
Technicien :	800 à 900 F

Géophysique :

Trainés de résistivité :

Mise en place et repli :.....	1 500 à 4 000 F (1)
Station de résistivité sur profils : (2 longueurs de ligne)	60 à 200 F selon le pas de mesure (80 à 120 F pour un pas de 50 m)

Sondages électriques :

(petite longueur de ligne ($AB/2 \leq 100$ m))

Mise en place et repli :	1 500 à 4 000 F (1)
Sondage :	500 à 700 F

Sismique marteau :

~ 300 F/station

Sismique réfraction : "grande profondeur"

Mise en place et repli :	~ 7 000 F
Station isolée :	1 500 - 2 400 F
Profils continus : (par km de profil)	~ 17 000 F (espacement des géophones 5 m) 12 000 F (espacement des géophones 10 m)

1) Ce poste est fonction de la distance entre le siège de l'entreprise et le terrain à explorer.

Diagraphies : (forages courts < 100 m)

P.S. - résistivité, γ , γ - γ
neutron-neutron, log sonique

Mise en place et repli :.....	1 500 à 4 000 F (selon distance)
Prix à la journée :.....	2 600 pour 1 outil 3 100 pour 3 outils
Prix au mètre de forage : 1 outil :	30 à 40 F
2 outils:	50 à 60 F
3 outils:	60 à 70 F

Sondages mécaniques : (2)

Matériaux meubles :

Tarière continue	100 à 200 F/m
Tarière Highway	4 500/jour (120 à 200 F/m)
V.P.R.H.....	4 500 F/jour (130 à 170 F/m)
Percussion-soupape.....	400 à 500 F/m
Benne-Benoto.....	> 350 F/m

Roches massives :

Forage au marteau (drill).....	110 à 180 F/m
Sondage carotté.....	500 à 800 F/m

Essais de laboratoire :

- lames minces, confection et
étude rapide..... 210 à 260 F/unité
- Granulométrie :
 - de 1,5 à 80 μ 160 F / échantillon

(2) Prévoir en plus l'amenée et le repli du matériel et le déplacement d'un trou à l'autre éventuellement.

< 2 mm :	~ 110 F/échantillon
<20 mm :	~ 200 F/échantillon
>20 mm :	~ 410 F/échantillon
Equivalent de sable :	85 à 105 F
Los Angelès :	250 à 340 F
Microdeval :	250 à 340 F
Fragmentation dynamique :	200 à 300 F
Friabilité des sables :	250 à 340 F
Densité apparente :	~ 45 F
Masse volumique :	~ 100 F
Porosité :	~ 100 F

Etude générale pour une superficie de l'ordre de 2 000 km²

(1 coupure à 1/100 000) Stade A

<u>- Compilation des données existantes :</u>		
- 10 jours ingénieur	19 200	] 42 800 F
- 20 jours technicien	23 600	
<u>- Etude géologique :</u>		
<i>Géomorphologie :</i>		
- 15 jours ingénieur	28 800	] 95 200 F
<i>Levés de terrain :</i>		
- 10 jours ingénieur	19 200	] 47 200
- 40 jours technicien	47 200	
<u>- Laboratoire :</u>		
<i>Alluvionnaire :</i>		
- 40 granulo x 300	12 000	] 29 200 F
- 15 identifications pétro	9 600	
- 20 essais mécanique (LA + MDE)	7 600	
<i>Roches massives :</i>		
- 30 examens pétro	9 000	] 20 400 F
- 30 essais mécaniques (LA + MDE)	11 400	
		<hr/>
		187 600 F
<u>- Synthèse + rapport :</u>		
- 25 % des travaux précédents	46 900	46 900 F
		<hr/>
		264 500 F

Coût au kilomètre carré étudié \neq 132 F sans travaux de géophysique ni de sondage.

Définition des zones favorables à l'exploitation sur un tronçon de vallée de 20 km² comportant 20 km² de gisement possible, avec une épaisseur moyenne d'alluvions de l'ordre de 10 mètres - (indications d'ordre général sur les coûts)

- Echelle : 1/25.000 - Stade B -

- 1° phase : Documentation et levés géologiques

- 4 jours d'ingénieur 7 680 F

- 15 jours de technicien supérieur 17 700 F

- 2° phase :

2.1. Réalisation de traînés électriques

à 2 longueurs de ligne :

maille 100 m x 200 m

1 000 points de mesure 100 000 F

2.2. sur 5 km² supposés favorables (25 % de la surface du gisement initialement possible).

1 sondage/3 ha

↓					
160 sondages =	32 en gros Ø	→	320 x 200 =	64 000	F
de 10 m	128 rarière petit Ø	→	1280 x 130 =	166 400	F

Essais : 100 granulo

50 ES.

20 Essais mécaniques

5 pétro.

	>	50 000	F
--	---	-------	--------	---

405 400 F

- Synthèse + Rapport..... 54 600 F

460 000 F

Gisement possible : 20 km² :

. Coût rapporté au km² de gisement possible : $\frac{460.000}{20} = 23.000$ F

Gisement étudié en détail (25 % de la surface initiale) défini en fonction des études techniques et des études de contraintes effectuées par ailleurs.

. Coût rapporté à l'hectare de gisement étudié en détail : $\frac{460.000}{500} = 920$ F

Gisement exploitable : 75 % de la superficie étudiée en détail :
épaisseur moyenne supposée égale à 8 m.

. Coût rapporté au m³ de granulats exploitables en place :

$460.000 / [(500 \times 80.000) \times 0,75] \leq 2$ centimes/m³

Définition de zones favorables à l'exploitation de roches massives calcaires pour l'alimentation d'un SDAU - Epaisseur utile de calcaire supposée de l'ordre de 25 m. (indications générales sur les coûts)

Echelle 1/25 000 - Stade B - Aire d'affleurement du calcaire : ~ 20 km²

- 1^o phase : Documentation

- 5 jours ingénieur	9 500	] 15 400]
- 5 jours technicien supérieur	5 900		
: <u>Levés géologiques - Echantillonnage</u>			
- 10 jours ingénieur	19 200	] 36 900	] 58 300
- 15 jours technicien supérieur	17 700		
: <u>Essais mécaniques</u>			
15 x 400	6 000		

- 2^o phase : Etude sur 8 sites totalisant 500 ha (25 % de la surface initiale)

- 60 sondages électriques	42 000] 365 100
<u>Sélection de 4 sites de 50 ha (10 % de la surface initiale)</u>		
- Exécution de 12 km de profils sismiques (12 000 x 12) + 7 200	151 100	
- 4 sondages carottés de 25 m 100 x 700	80 000	
- 20 sondages marteau + diagraphies 500 x 160	80 000	
- Essais mécaniques 30 x 400	12 000	

- Interprétation et synthèse 51 600
475 000

Gisement possible : 20 km²

. Coût rapporté au km² de gisement possible : $\frac{475.000}{20} = 23.750$ F

Gisement étudié en détail en 2 stades : (25 % puis 10 % de la surface initiale) défini en fonction des études techniques et des études de contraintes effectuées par ailleurs.

. Coût rapporté à l'hectare de gisement étudié en détail :

475.000 / (3x50 ha) ou (2x50 ha) = 3 166 à 4 750 F/ha.

Gisement exploitable : 2 ou 3 sites de 50 ha avec une épaisseur de matériaux de 25 m. en moyenne - . Coût rapporté au m³ de granulats exploitables -

475.000 / (3x500.000x25) } ≠ 1,3 à 2 centimes/m³
475.000 / (2x500.000x25)

Choix de zones favorables à l'exploitation sur des zones délimitées à 1/25.000
comme favorables, sur 3 km²: - échelle 1/10. 000 - stade C -

(surcoûts par rapport aux études à 1/25.000 du stade B)

- 1° phase :

- étude des résultats obtenus précédemment à 1/25.000

2 jours ingénieur..... 3 840 F

- 2° Phase :

2.1. Réalisation de trainés électriques

à 2 longueurs de ligne :

maille 50 x 200 m (complément à
l'étude au 1/25.000)

300 points de mesure..... 30.000 F

2.2. Sondages :

1 sondage / 3 ha

↓	}	5 en gros Ø	→ 50 m x 200 = 10.000 F
100 sondages de 10 m		95 en petit Ø	→ 950 m x 130 = 123.500 F

Essais : 100 granulo

50 E.S.

10 essais mécaniques

} 25.000 F

- Synthèse + Rapport..... 37.600 F

200.000

Gisement étudié en détail : 300 hectares

. Coût complémentaire à l'hectare étudié (surcoût par rapport aux études du
stade B à 1/25.000) : $\frac{200.000}{300} = 660$ F

Gisement exploitable : supposé représenter 80 % de la surface étudiée avec
une épaisseur moyenne de 8 m.

. Coût complémentaire rapporté au m³ de granulat exploitable :

$200.000 / [(300 \times 80.000) \times 0,80] \neq 1,1$ centime/m³

Choix de zones favorables à l'exploitation de roches massives sur 3 sites étudiés à 1/25.000 totalisant 120 hectares : échelle 1/10.000 - stade C (surcoûts par rapport aux études à 1/25. du stade B)

- 1° phase :

- étude des résultats obtenus précédemment
à 1/25.000
2 jours ingénieur 3 840 F

- 2° phase :

2.1. Exécution de 7 km de profils sismiques
(12.000 x 7) + 7.200 91.200 F

2.2. Sondages :
2 sondages carottés de 30 m
60 x 700.....,..... 42.000 F

10 sondages marteau + diagraphies :
250 x 160 40.000 F

2.3. Essais de laboratoire : (essais mécaniques)
20 x 400 8.000 F

2.4. Interprétation et synthèse 44.960 F

230.000 F

Gisement étudié en détail : 120 hectares

. Coût complémentaire à l'hectare étudié (surcoût par rapport aux études du stade B à 1/25.000) : $\frac{230.000}{120} = 1\ 916\text{ F}$

Gisement exploitable : supposé représenter 80 % de la surface de 2 des 3 sites étudiés, sur 25 m. d'épaisseur moyenne.

. Coût complémentaire rapporté au m³ de granulat exploitable :

$$230.000 / [(2 \times 400.000) \times 25 \times 0,8] \neq 1,5 \text{ centime/m}^3$$

Etude détaillée de gisement alluvionnaire : stade D

à 1/2 000 sur 20 hectares reconnus favorables par étude à 1/25.000

	a/	b/ variante
- Topographie	15 000	15 000
- Géophysique :		
- Traînée de résistivité (2 longueurs de ligne)		
Maille 25 x 25 m 7 profils/8	306 points à 75 F + 3 000 F	25 950 25 950
- Sondages tarière :		
. petit diamètre		
Maille 100 x 100 25 trous de 100 m	25 trous de 10 m	250 m à 130 F + 2 000 F
. Benoto ou pièges à graves		
5 trous de 10 m = 50 m x 350 F + 1 500 F	19 000	0
. Essais géotechniques		
20 granulo à 300 = 6 000		
4 "essais mécaniques à 400 = 1 600	8 600	3 000
10 E.S. à 100 = 1 000		
- <u>Suivi - Synthèse - Rapport</u>	16 950	16 050
	118 000	99 000

Coût à l'hectare de gisement étudié en détail : 4 950 à 5 900 F

Coût au m³ de matériau exploitable, en place :

$$\frac{115\ 000}{99\ 000} \left| : (200\ 000 \times 8\ \text{m} \times 0,8) = 7,7 \text{ à } 9 \text{ centimes/m}^3 \right.$$

Etude détaillée d'un gisement de roches massives : stade D

à 1/2 000 sur 20 hectares reconnus favorables par étude à 1/25.000

		Variante
- Topographie	15 000	10 000
- Géophysique :		
- Sondage électrique :		
Maille 50 x 100		
50 S.E. à 750 F	35 000	
+ 3 000		
ou		
- Résistivité		
Maille 25 x 50 m		
176 S.E. à 75 F		20 600
+ 300		
- Sondages carottés (1)		
2 sondages de 35 m = 70 m		
à 700 F/m	51 000	51 000
+ 2 000 F		
- Sondages marteau + diagraphies :		
18 x 30 m = 540 m à 170 F	91 800	63 200
	+	2 000
- Essais mécaniques		
- Observation pétrographique :	3 000 F	
- 20 Essais mécaniques à 400	8 000 F	
	.....	11 000
		7 000
- Suivi - Synthèse - Rapport	33 700	33 400
	<hr/>	<hr/>
	240 000	185 000

Coût à l'hectare de gisement étudié en détail : 9 250 à 12 000 F

Coût au m³ de matériau exploitable, en place :

240 000 |
185 000 | : (200 000 x 25 x 0,8) = 4,6 à 6 centimes

(1) Cas où l'on ne dispose pas de front de taille ancien.

B I B L I O G R A P H I E

- C. ARCHIMBAUD, Y. MARTIN-GUILLOU ; Influence des caractéristiques des gisements sur la conception des installations. Bull. Liaison L.P.C. N° Spécial Granulats - Juin 1977.
- C. ARCHIMBAUD, B. GRIVEAUX, M. RAT ; Reconnaissance des gisements rocheux - Méthodes actuelles. Bull. Liaison L.P.C. N° Spécial Granulats - Juin 1977.
- C. ARCHIMBAUD, B. GRIVEAUX, J. PEYBERNARD, M. RAT ; Reconnaissance des gisements rocheux - Perspectives nouvelles. Bull. Liaison L.P.C. N° Spécial Granulats - Juin 1977.
- J. AUBERT, J.M. LORAIN ; Calcaires lacustres de la région parisienne. Bull. Liaison L.P.C. N° Spécial Granulats - Juin 1977.
- B.R.G.M. - L.P.C. ; Carte des ressources en granulats de la région Melun-Montereau (1971).
- V. BERTON ; Projet de programme pour l'inventaire général des granulats en France - B.R.G.M. - Rapport 1970 inédit.
- J. CAUVIN, M. LESAUVAGE ; Principales caractéristiques des alluvions de la Marne. Bull. Liaison L.P.C. N° 55 - octobre-novembre 1971.
- M. CHAMPION, Ph. MAILLARD, P. CARIO ; Les alluvions de la Loire dans la région Centre - Inventaire de la production et des gisements. Bull. Liaison L.P.C. N° 56 - Décembre 1971.
- G. CHEVASSU ; Géophysique de surface appliquée à la reconnaissance de gisements de roches massives. Bull. Liaison L.P.C. N° 67 - Octobre-novembre 1973.
- A.P. CRESSARD, G. CHEVASSU, J. LE BRIS ; Identification géotechnique des matériaux dans le cadre d'une recherche de granulats marins. Bull. Liaison L.P.C. N° Spécial Granulats - Juin 1977.
- A.P. CRESSARD, J. LEMAIRE, J.P. LENOBLE ; Les granulats siliceux et calcaires du littoral français. Bull. Liaison L.P.C. N° Spécial Granulats - Juin 1977.
- M. DORIDOT, M. LESAUVAGE ; Etude des matériaux alluvionnaires de la vallée de l'Yonne. Bull. Liaison L.P.C. N° 69 - Janvier-février 1974.
- M. DORIDOT, S. RESENDE ; Etude des gisements de matériaux alluvionnaires pour la préparation d'un SDAU. Bull. Liaison L.P.C. N° Spécial Granulats - Juin 1977.
- R. FERRANDES ; Utilisation des méthodes géophysiques dans la recherche et l'étude des matériaux de carrière - B.R.G.M. - Chronique des matériaux de carrière - 1974.
- J.M. GEOFFRAY, A. MISHHELLANY, J. RESTITUITO ; Basaltes et pouzzolanes du Massif Central. Bull. Liaison L.P.C. N° Spécial Granulats - Juin 1977.
- B. GRIVEAUX, A. MALDONADO ; Schéma-type d'étude de carrière. Bull. Liaison L.P.C. N° 57 - Janvier-février 1972.
- B. GRIVEAUX ; Rôle des failles dans l'exploitation des roches massives. Bull. Liaison L.P.C. N° 73 - septembre-octobre 1974.
- B. GRIVEAUX ; Essai de fragmentation dynamique modifié sur les éclats de sondage destructif. Bull. Liaison L.P.C. N° 82 - Mars-avril 1976.
- H. HAVARD, N. MIGNOT, M. POTDEVIN ; SYGFRID pour la gestion sur ordinateur d'un fichier géotechnique de granulats. Bull. Liaison L.P.C. N° 84 - Juillet-août 1976.
- R. HORN, F. MERCIER ; Possibilités de la sismique réflexion continue dans l'étude qualitative des matériaux dragables - B.R.G.M. - Rapport 1974 inédit.
- J. HOLEF ; Les sables fins du Nord-Est du Bassin Parisien. Prospection et étude détaillée des gisements. Bull. Liaison L.P.C. Supplément au N° 33 - Septembre 1968.

INSTITUTE OF GEOLOGICAL SCIENCES : Assessment of British Sand and Gravel resources (1971, 1972, 1973) :

- The sand and gravel resources of the country around Witham, Essex - Description of 1 : 25 000 resource sheet TL 81,

- The sand and gravel resources of the country around Hethersett, Norfolk - Description of 1 : 25 000 resource sheet TG 10.

C. JAVEY ; Cartes des ressources en matériaux de construction et de viabilité - Les Andelys 1/50 000 - B.R.G.M. - Rapport inédit 1971.

J.P. JOUBERT, C. TOURENQ ; Instruction ministérielle provisoire sur les granulats. Bull. Liaison L.P.C. N° 94 - 1978.

G. OLIVIER ; Les comptages pétrographiques dans les granulats. Bull. Liaison L.P.C. N° 83 - Mai-juin 1976.

G. OLIVIER ; Ressources en matériaux de la Savoie. Bull. Liaison L.P.C. N° Spécial Granulats - Juin 1977.

A. PRAX - L. PRIMEL ; Prospection des gisements alluvionnaires. Bull. Liaison L.P.C. N° Spécial Granulats - juin 1977.

A. PRAX ; Modalités de traitement des matériaux alluvionnaires - RGRA N° 481 - Novembre 1972 p. 60-76.

L. PRIMEL ; Problèmes posés par l'identification des calcaires dans les sables et graviers. Bull. Liaison L.P.C. Supplément au N° 33 - Septembre 1968.

L. PRIMEL ; Recherche sur l'évolution des propriétés des matériaux alluvionnaires dans un bassin et mise en évidence de quelques caractéristiques générales. L.C.P.C. - Rapport de recherche N° 1 - Janvier 1969.

L. PRIMEL ; Les gisements de sables en France. Journées d'information "traitement des sables pour assises de chaussées". Bordeaux - Novembre 1976.

L. PRIMEL ; Les bilans de ressources en granulats. Bull. Liaison des L.P.C. N° Spécial Granulats - Juin 1977.

J. ROBERT ; Etude des matériaux alluvionnaires de la Haute-Garonne. Bull. Liaison L.P.C. N° 68 - Novembre-décembre 1973.

ILLUSTRATIONS : Les photographies et figures sont extraites du numéro spécial "Granulats" du Bulletin de Liaison des L.P.C. - Juin 1977 ainsi que de la Revue Générale des Routes et aérodromes N° 481 à l'exception des photographies de la page 14.1. et de la figure 5 (photos M. RAT).

exc. unique

G. NEAU

COMITÉ DE GESTION DE LA TAXE PARAFISCALE SUR LES GRANULATS

MÉTHODOLOGIE DES ÉTUDES DE RESSOURCES EN GRANULATS

(14.EG.45)

B.R.G.M.
- 7. OCT. 1963
BIBLIOTHÈQUE

RAPPORT



B.R.G.M.
Département matériaux

L.C.P.C.
Département géotechnique

79 SGN 577 MTX
G.M.X

COMITÉ DE GESTION DE LA TAXE PARAFISCALE SUR LES GRANULATS

**MÉTHODOLOGIE DES ÉTUDES DE RESSOURCES
EN GRANULATS**

(14.EG.45)

RAPPORT

par

Y.BERTON (*B.R.G.M.*) - L. PRIMEL (*L.C.P.C.*)

B.R.G.M.
Département matériaux
B.P. 6009
45060 ORLÉANS Cédex

L.C.P.C.
Département géotechnique
58, boulevard Lefebvre
75015 PARIS

79 SGN 577 MTX

L.C.P.C. 35

AVANT-PROPOS

Les études relatives aux ressources en granulats ne datent pas de l'institution de la taxe parafiscale. Celle-ci a cependant permis un développement notable de ces études dans le cadre d'instances de concertation créées à cet effet tant au plan local qu'au plan national. Depuis toujours, les exploitants avaient besoin de connaître l'extension du gisement sur lequel ils étaient implantés et avaient le souci de rechercher d'autres ressources pour assurer la pérennité de leur entreprise après l'épuisement du gîte en cours d'extraction. D'autre part, certains grands investisseurs avaient été amenés depuis longtemps à chercher des ressources proches des ouvrages à construire. Enfin, sur un plan plus général et sans qu'un ouvrage déterminé soit impliqué dans la recherche, certains organismes s'étaient préoccupés de recenser les ressources futures : le Bureau de Recherches Géologiques et Minières dont c'était l'une des vocations et les Laboratoires des Ponts et Chaussées, outils de l'un des consommateurs les plus importants avaient ressenti le besoin de telles études et avaient réussi à obtenir péniblement quelques ressources pour les mener à bien.

Les Crédits d'Action de Politique Industrielle (C.A.P.I.) avaient apporté un premier financement qui avait permis un développement de ces recherches plus ou moins systématiques.

C'est dire que le Comité de Gestion de la Taxe Parafiscale sur les Granulats n'avait pas eu à créer de toutes pièces des outils pour remplir l'un des objectifs de la taxe parafiscale : "..... financement des études et recherches effectuées en vue d'assurer

- la continuité des approvisionnements en sables et graviers et en matériaux concassés"

Mais il était très vite apparu que des conceptions diverses, voire opposées, présidaient à ces études : certains estimaient qu'il était du ressort de la puissance publique de dresser des cartes de ressource potentielle très générales, assez vagues pour ne pas engendrer de spéculation foncière et sans se préoccuper de la qualité des matériaux, donc de leur exploitabilité ; d'autres pensaient à l'opposé que de telles études n'avaient aucune utilité pratique et qu'il était indispensable de connaître les gisements réellement exploitables, et cela avec une finesse suffisante pour permettre une décision de mise en exploitation. A l'objection selon laquelle une telle prospection appartenait au seul professionnel, ils répondaient que l'exploitant devait aller beaucoup plus loin et connaître dans le détail les zones de son gisement, les variations de sa pétrographie, de la granularité, etc. ...

Bien entendu, entre ces positions que nous avons volontairement caricaturées pour les rendre plus tranchées mais qui étaient en réalité plus nuancées, se plaçaient toutes les opinions que l'on peut imaginer aisément.

Ce fut le mérite du regretté Président PROUST de comprendre à la fois la nécessité d'une doctrine du Comité de Gestion et la possibilité d'une synthèse entre ces positions extrêmes.

Deux circonstances en effet semblaient devoir favoriser cette synthèse : d'une part, le nouvel article 109-1 du Code Minier en instituant les "zones d'exploitation et de réaménagement coordonnés" (Z.E.R.C.) obligeait la puissance publique à se préoccuper, du moins dans certaines portions du territoire, de l'exploitabilité des gisements. D'autre part, certains opérateurs cherchaient à définir une méthodologie d'études des contraintes pesant sur les gisements et rendant certains de ceux-ci inexploitable.

En créant un groupe de travail qui étudierait en même temps la méthodologie des études de ressources et celle des études de contraintes, le Président du Comité de Gestion orientait vers la solution que nous présentons aujourd'hui.

Dès le début des réflexions du groupe de travail, il apparut en effet qu'études de ressources et études de contraintes dans une zone donnée devaient être menées parallèlement par une série d'approximations successives en accroissant progressivement la précision de ces études : il fallait de toute évidence commencer par dégrossir la connaissance des ressources potentielles en examinant en même temps de manière succincte les contraintes qui pesaient sur les gisements potentiels correspondants. Cette première phase devait délimiter les secteurs à examiner de façon plus approfondie tant du point de vue des gisements, de leur extension et de leur qualité que des contraintes, de leur incidence sur tels ou tels acteurs de la vie économique, de leur poids social.

Ainsi chaque phase de l'étude combinée ressources-contraintes doit déboucher sur la définition de la zone ou des zones dans lesquelles il faut continuer l'étude et de celles au contraire qu'il faut écarter.

Malheureusement, la méthodologie des études de contraintes est, d'une part, plus difficile que celle des études de ressources, et, d'autre part, a fait l'objet dans le passé de beaucoup moins de recherches.

Les deux volets du groupe de travail ont donc progressé de façon très inégale et, alors que le document relatif aux études de ressources est prêt, celui que nous espérons voir sortir un jour et qui traitera des études de contraintes est encore en gestation.

Il aurait pu sembler logique d'attendre pour publier le premier que le second soit rédigé. Le parallélisme entre les deux démarches eût été ainsi mieux affirmé et le travail présent plus cohérent.

Le groupe de travail n'en a pas moins estimé que la publication de la méthodologie des études de ressources rendrait de grands services non seulement aux opérateurs de ces études mais encore aux groupes de concertation départementaux, et qu'il serait donc fâcheux d'attendre.

Il paraît inutile de présenter le travail lui-même. Il est le résultat de la collaboration de deux hommes, représentant les deux groupes d'organismes qui ont fait dans le passé le plus d'études de ressources, à savoir le B.R.G.M. et les laboratoires des Ponts et Chaussées, et représentant aussi les deux tendances que nous avons caricaturées précédemment.

MM. BERTON et PRIMEL ont réalisé un travail important et dont il convient de les remercier. Ils l'ont fait malgré leurs nombreuses occupations. Mais comme les hommes compétents sont toujours très occupés, force était de s'adresser à eux. Les spécialistes apprécieront, nous n'en doutons pas, la qualité de leur travail et la précision des indications qu'ils fournissent. Les généralistes y trouveront les orientations à donner aux études.

Les puristes trouveront des redites dans le document que nous présentons. Qu'ils sachent qu'elles sont volontaires, car nous avons voulu éviter aux opérateurs d'être trop souvent obligés de se reporter d'une partie à une autre pour trouver un complément. Du reste, un même méthode de travail envisagée sous deux aspects différents gagne à recevoir un éclairage différent. Nous n'avons pas voulu, par souci excessif de cohérence dans le détail, perdre cette richesse.

Tel qu'il est, ce document sera, nous en sommes certains, extrêmement utile. Nous voulons seulement manifester l'espoir de pouvoir, d'ici peu de temps, présenter un document analogue pour les études de contraintes.

G. ARQUIE

Ingénieur Général des Ponts et Chaussées

S O M M A I R E

- 1 - INTRODUCTION : Circonstances et but de l'étude.

- 2 - GENERALITES :
 2. 1. Motivations des études de ressources.

 2. 2. Les utilisateurs des études de ressources en matériaux.
 2. 2. 1. Approvisionnement en granulats -
 2. 2. 2. Aménagement de l'espace -
 2. 2. 3. Autres utilisateurs -

 2. 3. Types de matériaux faisant l'objet d'études de ressources.

 2. 4. Objectifs généraux et différents types d'études de ressources.

 2. 5. Objectifs des études de ressources aux différents niveaux de précision.
 2. 5. 1. Etudes générales -
 2. 5. 2. Délimitation de secteurs favorables -
 2. 5. 3. Définition de secteurs en vue de leur exploitation et prévision de leur vocation ultérieure -
 2. 5. 4. Etudes détaillées préparatoires à l'exploitation des gisements -

 2. 6. Différents types de gisements à étudier.
 2. 6. 1. Gisements de granulats meubles -
 2. 6. 2. Gisements de roches massives -

 2. 7. Etudes de contraintes et études de ressources en granulats.

3 - METHODES DE PROSPECTION :

3. 1. Prospection des gisements de roches massives.

- 3. 1. 1. Etude géologique -
- 3. 1. 2. Méthodes électriques -
- 3. 1. 3. La sismique réfraction -
- 3. 1. 4. Les sondages : ... sondages au marteau perforateur -
 - a) suivi,
 - b) vitesse d'avancement,
- 3. 1. 5. Les diagraphies :
 - a) Matériel,
 - b) Radioactivité naturelle,
 - c) Résistivité,
 - d) Vitesse du son,
 - e) Autres sondes,
 - f) Résultats,
- 3. 1. 6. Essais et identifications -

3. 2. Prospection des gisements de roches meubles.

- 3. 2. 1. Utilisation des photos aériennes - Topographie -
- 3. 2. 2. Géophysique : résistivité -
- 3. 2. 3. - sismique - réfraction -
- 3. 2. 4. - magnétotellurique artificielle -
- 3. 2. 5. Sondages :
 - 3.2.5.1. Sondages "rapides"
 - 3.2.5.2. Autres méthodes légères
 - 3.2.5.3. Autres sondages
- 3. 2. 6. Essais et identifications -
 - 3.2.6.1. granularité,
 - 3.2.6.2. pétrographie - minéralogie - caractéristiques mécaniques,
 - 3.2.6.3. Propreté,

4 - MOYENS A METTRE EN OEUVRE AUX DIFFERENTS NIVEAUX D'ETUDE:

4. 1. Niveau général -

- 4. 1. 1. Compilation des données existantes -
- 4. 1. 2. Etude géologique avec les moyens légers :
 - a) bassin versant,
 - b) étude géomorphologique,
 - c) levés de terrain
et essais sur matériaux - Gisements alluvionnaires
- Gisements de Roches
massives.

4. 2. Niveau moyen -

- 4. 2. 1. Gisements alluvionnaires -
 - a) objectifs des études,
 - b) première phase d'intervention,
 - c) seconde phase d'intervention - géophysique
- sondages.
 - d) classement des gisements, présentation des
résultats,
- 4. 2. 2. Gisements de roches massives -
 - a) La découverte,
 - b) Le matériau exploitable,
 - c) Comment étudier les sites de roches massives,
 - géophysique de surface,
 - sondages carottés,
 - sondages destructifs et diagraphie,
- 4. 2. 3. Conclusions sur les études de niveau moyen -

4. 3. Etude détaillée d'un gisement -

- 4. 3. 1. Gisements alluvionnaires -
 - a) Stade 1 : Détermination des paramètres géométriques,
 - b) Stade 2 : Détermination des paramètres qualitatifs,
- 4. 3. 2. Gisements de roches massives -

5 - COÛTS DES ETUDES DE RESSOURCES EN GRANULATS

- 5.1. Coûts élémentaires des différentes méthodes utilisées.
- 5.2. Coûts des différents types d'études.
 - 5.2.1. Niveau général.
 - 5.2.2. Niveau moyen.
 - 5.2.3. Etudes détaillées de gisement.
- 5.3. Coût des études déjà financées par la taxe parafiscale sur les granulats.
- 5.4. Optimisation de l'emploi des moyens financiers dans l'inventaire des ressources en granulats.

6. - CONCLUSIONS

1 - INTRODUCTION

La taxe parafiscale sur les granulats a financé, depuis 3 ans, un nombre important d'études de ressources en granulats dans pratiquement toutes les régions.

Certaines études sont considérées comme très utiles par les services qui les ont demandées. D'autres par contre, apparaissent insuffisantes et / ou difficilement exploitables sur le plan opérationnel soit que, pour des raisons diverses, elles aient été effectuées dans de mauvaises conditions, soit que les problèmes à résoudre, lors de la formulation de l'étude n'aient pas été suffisamment explicités.

Le but du présent travail méthodologique est d'essayer de cerner les motivations et les objectifs des études de ressources en granulats et de définir les méthodes à employer et la densité des observations à effectuer pour réaliser ces études dans les meilleures conditions du point de vue de leur utilisation ultérieure, en fonction :

- des objectifs à atteindre,
- des caractéristiques des gisements à étudier.

L'approvisionnement en granulats de la collectivité pose une série de problèmes dont les études de ressources ne constituent que l'un des volets. En particulier celles-ci ne se justifient que dans la mesure où existe un besoin en granulats à satisfaire. Avant d'inventorier de façon précise la ressource, il est donc normal d'étudier qualitativement et quantitativement les besoins en précisant leur localisation. De même, lorsque la ressource en granulats est connue, peut se poser le problème de l'acheminement des matériaux vers les lieux d'utilisation et s'il s'agit de matériaux "non classiques" (matériaux de substitution par exemple) le problème des conditions de leur mise en oeuvre. On verra également que les études de ressources en granulats doivent être menées simultanément avec les études des contraintes qui commandent l'utilisation des sols.

2 - GENERALITES

2. 1 Motivation des études de ressources :

La consommation des granulats (1) a évolué, en France, depuis une vingtaine d'années, dans le sens d'un accroissement considérable. Elle était, en 1950, de l'ordre de 42 millions de tonnes et elle a atteint, en 1975, environ 380 millions de tonnes. Depuis 1975, la consommation et la production nationales ont connu une stagnation, voire une régression (1977 : 350 millions de tonnes). Il n'en demeure pas moins que le volume annuel de la production est considérable (7 tonnes / habitant / an). En 1977, la production se composait de 230 millions de tonnes de matériaux meubles (alluvions en très grosse majorité) et 120 millions de tonnes issues du concassage de roches massives. Environ 60% des granulats sont utilisées dans la construction et 40% en viabilité.

La satisfaction des besoins en granulats implique que des gisements de ces matériaux puissent être exploités. La motivation première des études de ressources en granulats sera donc de mettre en évidence les volumes et qualités de matériaux exploitables pour les besoins de la construction et de la viabilité et de fournir les données nécessaires à leur mise en exploitation.

Sauf pour les grands travaux qui n'ont qu'une durée de vie limitée et pour les travaux routiers d'entretien qui consomment les deux tiers des granulats de viabilité, la consommation de granulats est concentrée habituellement dans les agglomérations importantes. Pour des raisons d'économie de transport, la production elle-même doit se développer autant que possible au voisinage des centres de consommation que sont les villes.

Les carrières de granulats, compte tenu du volume de la production, ont besoin de superficies importantes (surtout les carrières de matériaux alluvionnaires) pour opérer dans de bonnes conditions - on évalue à 25 km² environ, par an, l'espace qui leur est nécessaire - Or, c'est à proximité des villes que la concurrence pour l'occupation des sols est la plus forte. Il est donc nécessaire, en vue d'un aménagement rationnel de l'espace, dans ces zones de forte demande, de choisir les emplacements les mieux adaptés pour l'implantation des carrières. Un des critères déterminants de ce choix est l'existence, dans le sous-sol de ressources exploitables, tant au point de vue de la qualité du matériau que des volumes extractibles et des coûts de l'extraction.

L'organisation de l'espace dans les zones de forte concurrence pour l'occupation des sols constitue ainsi la seconde motivation essentielle des études de ressources en granulats.

Dans l'optique de l'aménagement, la motivation des études de ressources va, en réalité au delà de la seule sélection de gisements à mettre en exploitation.

... / ...

(1) Définition des granulats : Matériau grenu de provenance naturelle ou artificielle destiné notamment à la confection des bétons (Norme NF.).

En effet, la définition complète d'une ressource peut apporter des données diverses telles que ses caractéristiques, ses relations avec le milieu encaissant, les moyens à mettre en oeuvre pour l'extraire et la traiter toutes indications permettant d'évaluer l'impact d'une exploitation sur l'environnement proche ou même relativement éloigné et de prévoir les dispositions à prendre.

En outre, il faut garder à l'esprit la notion que l'exploitation d'une carrière, quoique de longue durée dans beaucoup de cas, est une opération transitoire portant sur un terrain pour lequel une vocation ultérieure est à trouver. L'étude des ressources en matériaux doit permettre de prévoir la configuration d'un terrain à l'issue de l'exploitation qui y sera menée, de savoir s'il sera à sec ou en eau, de connaître la nature des fronts de taille, etc ... Ces éléments sont indispensables pour préciser, avant la mise en exploitation, les dispositions de remise en état ainsi que pour envisager la vocation ultérieure des sols.

L'expérience montre qu'une reconnaissance insuffisante des gisements de granulats entraîne de mauvaises conditions d'exploitation et de remise en état des sols.

2. 2 Les utilisateurs des études de ressources en matériaux :

Les motivations de ces études de ressources désignent clairement deux catégories d'utilisateurs, selon qu'ils ont en charge l'approvisionnement en granulats ou l'aménagement de l'espace.

2. 2. 1 Utilisateurs ayant en charge l'approvisionnement en granulats :

o Ce sont les exploitants de carrières qui sont intéressés le plus directement par les résultats des études de ressources en matériaux et ceci, à plusieurs titres :

- pour la conduite des exploitations en cours afin d'avoir une bonne connaissance des limites de gisement et des caractéristiques des matériaux en vue de satisfaire qualitativement et quantitativement le marché.
- pour la remise en état des sols en fin d'exploitation.
- pour les acquisitions foncières nécessaires à la poursuite de leurs activités et d'une manière générale pour prévoir les investissements nécessaires (foncier - matériel d'exploitation - ...).

o En tant que responsables de la gestion des ressources en matériaux, les Services des Mines doivent s'assurer que, localement, des ressources en granulats sont disponibles et peuvent être mises en exploitation pour satisfaire les besoins dans des conditions économiques normales. En outre, les Services des Mines ont la responsabilité de l'instruction des autorisations d'exploiter et des

prescriptions concernant la police des exploitations et la remise en état des sols. Ceci implique que les ressources soient connues ainsi que les conditions de gisement.

En tant que réalisateurs d'équipement : viabilité, construction d'ouvrages, les Services de l'Équipement ont intérêt à pouvoir se procurer les granulats de qualité adéquate dans les meilleures conditions possibles et donc de connaître les ressources convenablement situées.

2. 2. 2 Utilisateurs ayant en charge l'aménagement de l'espace :

D'une manière générale, tout aménagement doit prendre en compte l'ensemble des données du milieu et il faut se rendre compte que l'existence de ressources exploitables dans le sous-sol est l'une de ces données fondamentales. Un aménagement réalisé sur un gisement exploitable peut en effet aboutir à sa stérilisation complète et s'il est quelquefois nécessaire d'en arriver là, il faut au minimum en être conscient et en évaluer les conséquences.

Les Services de l'Équipement sont notamment intéressés à la connaissance des ressources en granulats, pour la raison vue ci-dessus mais également en tant que responsables de l'aménagement du territoire. Ils ont en effet à tenir compte des diverses utilisations des sols et l'exploitation des matériaux en est une possible seulement là où se trouvent les gisements. Ils ont également à prévoir l'utilisation possible des terrains après leur exploitation et leur remise en état, lequel peut dépendre, pour beaucoup, des conditions de gisement des granulats.

Les services extérieurs du Ministère de l'Agriculture ayant en charge les problèmes d'aménagement rural, sont également concernés par les études des gisements et les possibilités d'utilisation des sols après exploitation.

Pour ces mêmes raisons d'aménagement du territoire, les études de ressources en granulats intéressent les différentes collectivités territoriales et les missions d'aménagement.

2. 2. 3 Autres utilisateurs :

La connaissance des ressources en granulats peut, d'une manière moins systématique, être nécessaire à l'autres utilisateurs, par exemple, les responsables des problèmes d'environnement à cause des altérations du milieu et des nuisances susceptibles d'être engendrées par des exploitations, les responsables des infrastructures de transport dans la mesure où l'exploitation de granulats implique le transport de tonnages importants, etc...

2. 3 Types de matériaux devant faire l'objet d'études de ressources :

Selon les ouvrages à réaliser divers types de granulats sont employés.

Il existe cependant de nombreuses possibilités de substitution d'un type de granulat à un autre, notamment entre graviers alluvionnaires et graviers obtenus par concassage.

D'une manière générale, un inventaire exhaustif de ressources en granulats devra donc porter, pour une région donnée, sur tous les types de roches utilisables en vue de la production de granulats aussi bien matériaux granulaires meubles que roches massives. Une raison supplémentaire à cette recommandation est l'intérêt d'une utilisation optimale de l'ensemble de la ressource disponible et la diminution de certains gaspillages. C'est ainsi par exemple que, faute d'une bonne connaissance de la ressource, il arrive encore que l'on utilise certains granulats "nobles" dont les ressources sont limitées pour la réalisation de remblais alors que d'autres matériaux de qualité inférieure pourraient être employés sans inconvénient.

De même, il peut être tout à fait contre indiqué d'exploiter certains granulats alluvionnaires qui constituent un aquifère utilisable quand des ressources substituables en granulats de roches massives sont disponibles : encore faut-il, dans ce cas, connaître la valeur du matériau de substitution (qualité technique, coût) et l'importance des réserves.

2. 4 Objectifs généraux et différents types d'études de ressources :

Selon la motivation des études de ressources en granulats, les données à acquérir peuvent être différentes dans leur contenu et dans leur précision.

L'exploitant des sables et graviers, par exemple, aura besoin d'acquérir, sur le secteur délimité qu'il envisage d'exploiter à brève échéance, un maximum de données:

- localisation précise du gisement exploitable : géométrie détaillée du gisement : extension en surface, puissance du recouvrement et du niveau exploitable, topographie du sommet et de la base de la masse exploitable, volumes du recouvrement et du matériau utilisable.
- caractéristiques des matériaux en tous points du gisement : nature, propriétés des constituants, granularité, propreté, ...
- conditions du milieu à exploiter : compacité et dureté du matériau en place, présence, et position de la nappe phréatique, possibilité de drainer l'excavation, présence de discontinuités...

A l'opposé, le responsable des problèmes de transport, par exemple, aura besoin seulement de connaître, en ce qui concerne la ressource en granulats, un nombre limité de données synthétiques :

- localisation générale des gisements,
- ordre de grandeur de volumes de matériaux exploitables,

La précision des données à acquérir dépend également de circonstances économiques et du contexte géologique. Dans une zone où la concurrence pour l'occupation des sols est assez faible et où la ressource est abondante et homogène, une localisation et une qualification générales des gisements seront suffisantes aussi bien pour le responsable de l'approvisionnement que pour le responsable de l'aménagement. Par contre, dans un secteur où la planification de l'occupation des sols doit être précise (plan d'occupation des sols - schéma d'aménagement et d'exploitation coordonnés) et où les besoins en granulats sont importants, il sera nécessaire, en vue d'un aménagement rationnel et pour optimiser l'exploitation des granulats, de préciser, pour chaque secteur, le volume et les qualités de la ressource, son exploitabilité, l'état des lieux prévisible à l'issue de l'exploitation.

Il est donc concevable que, selon leur motivation, les études de ressources en granulats puissent avoir des objectifs différents et des résultats formulés de manière très variée. Cependant, en ce qui concerne les études effectuées avec un financement public, il est souhaitable qu'elles apportent dans tous les cas une réponse aux points essentiels suivants qui intéressent, à divers titres, la collectivité :

- localisation des gisements exploitables de granulats,
- appréciation quantitative et qualitative des matériaux qu'ils renferment,
- conditions possibles d'exploitation des gisements,
- état des lieux prévisible à l'issue de l'exploitation des gisements,
- conséquences immédiates de l'exploitation sur le milieu.

Des éclaircissements sont ici nécessaires en ce qui concerne les termes "gisements de granulats exploitables" - On considèrera, dans ce qui suit, qu'un "gisement de granulats" est un corps géologique - quelle que soit son origine - susceptible d'être exploité pour fournir des granulats techniquement utilisables. Le gisement est "exploitable" lorsque le matériau peut être extrait dans des conditions économiques normales à l'époque où l'étude est réalisée. L'existence d'un gisement exploitable ne préjuge en rien de la possibilité effective de l'exploiter notamment en regard des contraintes de divers ordres qui pourraient s'y opposer. On reviendra, dans un paragraphe suivant, sur le problème des contraintes.

En vue d'acquérir des données énoncées ci-dessus et qui constituent les objectifs à atteindre, les différents types d'études de ressources en granulats se différencient essentiellement par leur précision ou, à l'inverse, par l'extension de la zone d'étude.

Voyons quelle est, dans la pratique, la démarche en ce domaine. On peut la schématiser ainsi :

- o. Prise de conscience d'un besoin en granulats dans une aire déterminée (habituellement une agglomération) et du fait que les gisements en cours d'exploitation ne pourront plus, à court ou moyen terme, répondre à la demande.

- Recherche de différentes possibilités nouvelles de gisements pour satisfaire aux besoins - Elimination des zones sans intérêt . (Stade A)
- Etude plus ou moins détaillée et comparative des différentes possibilités de gisement - Détermination de zones d'intérêt. (Stade B)
- Délimitation des zones exploitables où les ouvertures de carrière pourront être autorisées. (Stade C)
- Etudes détaillées préparatoires à l'exploitation. (Stade D)

Alors que les trois premiers stades d'étude présentent un intérêt pour la collectivité dans la mesure où celle-ci veut contrôler le développement des exploitations, ce quatrième stade présente surtout un intérêt pour l'exploitant, car il est destiné principalement à déterminer la conduite optimale de l'exploitation.

Sans vouloir entrer ici dans le détail, on peut affirmer que le coût des différents stades d'étude va croissant du Stade A au Stade D, d'un facteur 1 à 100 - C'est d'ailleurs une des raisons pour laquelle il serait tout à fait irrationnel, pour des études ayant un intérêt général, de passer directement au stade de la définition des gisements (Stade C) en éliminant les stades préliminaires, sauf si un problème précis se pose dans un secteur donné. Une telle manière de procéder conduirait soit à un choix mal fondé des secteurs étudiés, soit à un gaspillage financier dans la mesure où le manque de sélection au départ conduirait à étudier des zones sans intérêt.

Il est donc logique, dans les études de ressources en granulats, de procéder par phases successives de plus en plus détaillées et portant sur des superficies de plus en plus réduites. Ces phases sont calquées de manière plus ou moins formelle sur les étapes de la démarche décrite ci-dessus. Ce phasage est en fait essentiel si l'on considère les différentes motivations des études de ressources en granulats.

En effet, leur cheminement conduit à une succession de choix qui procèdent des gisements eux-mêmes et de leur intérêt relatif mais aussi d'une série de contraintes extérieures qu'il est nécessaire de prendre en compte à chaque étape.

L'étude des ressources aux différents stades de précision (aux différentes échelles) doit être menée en parallèle avec l'étude de toutes les autres données (occupation des sols, environnement, économie). Le passage d'un stade d'étude à un autre plus précis doit résulter d'une synthèse de toutes les données et d'arbitrages pris ainsi en connaissance de cause.

CADRE GENERAL DES ETUDES EN VUE DE L'EXPLOITATION DES GISEMENTS DE GRANULATS

PHASES	ECHELLE ET CADRE DE REFERENCE	ETUDES DE RESSOURCES			AUTRES ETUDES A MENER EN PARALLELE AVEC LES ETUDES DE RESSOURCES			
		OBJECTIFS	CONTENU	METHODES	ECONOMIQUES	TECHNIQUES	D'ENVIRONNEMENT	D'AMENAGEMENT
A	1/100 000 ou plus petit milliers de km ² (département)	- cadrage - définition de zones de ressources - études de substitution	- Localisation générale des différents types de gisements. - Caractérisation sommaire des qualités et utilisations possibles. - Ordre de grandeur des volumes possibles.	- Synthèse de la documentation existante. - Utilisation de moyens légers (géologie, morphologie) - Echantillonnage essais de laboratoire principalement sur matériaux peu connus, non exploités.	ETUDE DES BESOINS	- Etude de valorisation	- Cadrage - Repérage des problèmes majeurs (consultations)	
B	1/25 000 dizaines à centaine de km ² . SDAU ou équivalent.	- Orientation des choix. - Définition des priorités relatives d'affectation des zones exploitables.	- Définition des zones favorables à l'exploitation. - Identification des différents secteurs: qualités, volumes de matériaux, conditions de gisement.	- Géophysique pour cerner les zones les plus favorables. - Sondages pour étude de la géométrie des gisements et échantillonnage. - Essais géotechniques.			- Etudes de faisabilité: . valorisation . transport	- Recensement des contraintes réglementaires et des contraintes majeures d'environnement. - Repérage des conflits existants ou éventuels . milieu . activités . paysage	- Elaboration de schémas directeurs (SDAU...)
C	1/10 000 quelques km ² P. O. S.	- Définition des zones préférentielles d'exploitation pour permettre à l'autorité politique d'arrêter des choix.	- Délimitation des secteurs exploitables. - Caractérisation des matériaux dans les secteurs exploitables (qualités-quantités). - Prévision des conditions d'exploitation-remise en état.	id. phase B mais densité d'observations et de mesures plus importantes.			- Affinement des études de certains milieux. - Définition de la relativité des contraintes.	- Affectation des sols (P. O. S.) - Définition de zones Article 109-1
D	ZONE ARTICLE 109-1 1/1000 à 1/22500 dizaines à centaine d'ha. Zone à exploiter.	- Définition des moyens à mettre en oeuvre pour l'exploitation-remise en état des sols.	- Définition des conditions d'exploitation, de traitement des matériaux, de remise en état des sols. - Définition quantitative et qualitative des matériaux commercialisables.	- Compléments de topographie. - Systématisation des mesures géophysique, des sondages et des essais de laboratoire.	- Etude de coût d'exploitation et de traitement.	- Etude de matériel d'exploitation et de traitement.	- Etude d'impact	- Plan de remise en état des sols. - Plan de réaménagement.

2. 5 Objectifs des études de ressources aux différents niveaux de précision : (voir aussi tableau ci-contre).

2. 5. 1 Etudes générales : Connaissance globale des ressources au niveau d'une région (Stade A).

- Localisation générale des matériaux utilisables comme granulats :

Exemple : Tronçon de vallée -

Massif de roches calcaires -

- Caractérisation sommaire des qualités de ces matériaux :

Nature - Enveloppe de la granulométrie, résultats de quelques essais géotechniques -

- Ordre de grandeur des ressources :

- Conditions générales d'exploitation :

Exemple : Fond de vallée - Terrasse - Relief ...

- Etat possible des lieux après exploitation :

Exemple : Fosses à sec ou en eau -

Paliers à flanc de relief -

Ces études correspondent à une échelle de représentation de l'ordre de 1 / 100.000°.

2. 5. 2 Définition de secteurs favorables à l'exploitation des granulats en vue de l'approvisionnement d'une zone de consommation : SDAU, Agglomérations ... (Stade B)

- Délimitation des secteurs à une échelle de l'ordre de 1 / 25.000°.

- Caractérisation des matériaux permettant de définir les différents types de granulats, l'homogénéité des gisements.

- Evaluation sommaire des volumes par secteur - (découverte et matériau utile).

- Conditions d'exploitation par secteur : ordres de grandeur comparés du coût des matériaux se traduisant par une gradation dans l'intérêt des gisements.

° Définition des possibilités d'utilisation des terrains après exploitation.

Ces études correspondent à une échelle de représentation de l'ordre de 1 / 25.000°. Elles doivent permettre d'attribuer à chaque secteur une valeur relative en ce qui concerne l'exploitation des granulats. Leur précision pourra être variable en fonction de la difficulté de la reconnaissance: selon la nature du matériau (alluvionnaire ou roche massive) et selon l'importance du recouvrement ou de l'altération qui masque le matériau exploitable.

2.5.3. Définition de secteurs en vue de leur exploitation et prévision de leur vocation ultérieure: (Stade C)

- ° Délimitation à l'intérieur des secteurs définis précédemment comme favorables, des variations qualitatives et des ratios quantitatifs de façon à délimiter les zones exploitables où l'ouverture de carrières pourra être autorisée. Il est possible après cette phase de bien localiser les différents types de matériaux exploitables, de connaître les volumes utilisables avec une bonne précision, de prévoir un schéma d'exploitation et de traitement des matériaux.
- ° La connaissance du gisement doit être suffisamment approfondie pour permettre de prévoir les possibilités de réutilisation du site et les conséquences qu'elles entraînent pour le mode d'exploitation.

Ce stade correspond à des études à une échelle de représentation de l'ordre de 1 / 10.000°. Les zones où les carrières seront autorisées, délimitées dans les Plans d'occupation des sols, devront faire l'objet de ce type d'études au moins lorsqu'elles ne constituent qu'une fraction réduite du territoire concerné par le Plan. En ce qui concerne les zones d'exploitation et d'aménagement coordonnés (article 109-1 du Code minier) la précision des études est au minimum 1 / 10.000. En effet, dans ce cas, la Puissance publique se substitue pour partie à l'exploitant en désignant à celui-ci la zone à exploiter et les conditions à respecter en vue d'aboutir à un aménagement déterminé. Il importe donc que le gisement soit connu avec une bonne précision.

2.5.4. Etudes détaillées préparatoires à l'exploitation des gisements:
(Stade D)

- ° délimitation exacte des secteurs à exploiter,
- ° définition du mode de découverte du gisement et du mode d'exploitation,
- ° définition du matériel à utiliser pour l'extraction et le traitement des matériaux,
- ° définition des produits qui pourront être commercialisés,

- étude des mouvements de terre nécessaires pour la remise en état des sols. (épaisseur-qualité-mode de stockage)

Ces études qui sont de la responsabilité et à la charge de l'exploitant lui sont utiles pour la conduite de l'exploitation et de la remise en état des sols ainsi que pour la détermination précise des coûts de production. Elles sont réalisées à une échelle de l'ordre de 1 / 1.000°. et généralement lorsque la décision d'exploiter a été prise.

Le découpage de ces objectifs correspondant aux différents stades d'étude, tel qu'il est indiqué ci-dessus, ne doit pas être considéré comme absolu. Il faut cependant retenir que la démarche rationnelle dans l'inventaire des ressources doit aller du général au particulier.

En ce qui concerne les moyens à mettre en oeuvre dans les études de ressources en granulats, on distinguera :

- un niveau général correspondant au Stade A,
- un niveau moyen correspondant aux Stades B et C.
Les moyens d'étude à mettre en oeuvre sont les mêmes pour ces deux stades qui ne se différencient que par la densité des observations, des mesures géophysiques et des sondages, la précision des résultats étant naturellement plus grande pour le stade C.
- un niveau détaillé correspondant au Stade D qui précède immédiatement la mise en exploitation des gisements.

2. 6 Différents types de gisements à étudier :

Il a été indiqué au paragraphe 2.3 ci-dessus qu'une étude de ressources en granulats, pour être complète, devait concerner tous les types de matériaux susceptibles de produire des granulats. Les différents gisements utilisables pour la production de granulats sont ici passés en revue brièvement.

2. 6. 1 Gisements de granulats meubles :

Les matériaux actuellement exploités en plus grande masse sont les granulats alluvionnaires : dépôts mis en place par les cours d'eau et qui renferment sous forme de sables graviers les éléments généralement les plus durs des formations géologiques situées à l'amont des gisements. Outre les qualités mécaniques des éléments qu'ils renferment, ces dépôts ont souvent l'avantage d'être propres (exempts de fines argileuses).

Les formations d'origine glaciaire ou fluvio-glaciaire peuvent constituer, dans les régions montagneuses en France, des gisements de granulats importants, mais elles sont généralement beaucoup plus grossières et hétérogènes que les graves alluvionnaires.

Les formations de pente, éboulis de falaise en région montagneuse, les colluvions, les nappes ou lentilles de solifluxion peuvent être localement des sources de granulats.

Les formations éoliennes : dunes plus ou moins actuelles, représentent une classe particulière de granulats par la finesse des éléments qui les constituent.

Les formations résiduelles issues d'altérations, quoique généralement très hétérogènes, constituent quelquefois des accumulations pouvant, dans certains cas, présenter un intérêt comme gisements de granulats.

Les formations marines anciennes, faciès littoraux en général peuvent être d'origine détritique. Lorsqu'elles ne sont pas cimentées, elles peuvent constituer des dépôts très importants : sables ou graves. Ce sont les très nombreux dépôts sableux et parfois graveleux des ères secondaires et tertiaires (Ex : Sables du Perche, de Sologne, de Fontainebleau, sables pliocènes de Normandie ...). Pour mémoire, leur étude n'étant pas envisagée ici, on citera le cas des matériaux meubles exploitables en mer. Il peuvent, comme les gisements terrestres avoir diverses origines. On notera seulement les gisements d'origine alluvionnaire submergés postérieurement à leur dépôt et les accumulations formées par l'action des courants marins, plages, dunes hydrauliques, etc ...

Tous ces dépôts meubles ont en commun le fait de résulter d'une sélection de leurs constituants issue d'une altération météorique suivie d'un transport plus ou moins long. Il s'agit donc, en général et sauf altérations postérieures à leur dépôt et sauf le cas où leur bassin versant est exclusivement constitué de roches tendres de matériaux ayant des caractéristiques mécaniques relativement bonnes. Toutefois, étant donné leur mode de transport et de dépôt, les granulats meubles forment généralement des gisements hétérogènes en ce qui concerne la granularité et la propreté. Il faut également signaler, parmi les gisements de roches meubles, les matériaux de terrils résultant d'une activité minière ou industrielle: stériles miniers, résidus de flottation, laitiers, scories d'incinération, etc. Ces matériaux, hétérogènes bien souvent et considérés initialement comme des déchets peuvent, dans certains cas et éventuellement avec un traitement approprié, fournir des granulats utilisables. C'est le cas notamment des schistes houillers "brûlés" du Nord-Pas-de-Calais.

2.6.2. Gisements de roches massives:

Seules les roches massives ayant de bonnes caractéristiques mécaniques sont susceptibles de constituer des gisements de matériaux dont le concassage fournira des granulats utilisables.

On distingue traditionnellement:

- les roches calcaires provenant de formations sédimentaires il s'agit habituellement de formations stratifiées en bancs plus ou moins épais, horizontaux ou inclinés. Toutefois certains gisements (calcaires récifaux, calcaires métamorphisés) peuvent être pratiquement sans joints de stratification.
- les roches éruptives et cristallophylliennes - Il s'agit de roches ignées (plutoniques ou en dykes ou effusives) et de certaines roches résultant de métamorphisme de formations ignées ou sédimentaires.

Alors que les gisements de granulats meubles ont des épaisseurs généralement faibles, de l'ordre de 3 à 10 mètres, notamment en ce qui concerne les formations alluvionnaires, les gisements de roches massives sont en moyenne beaucoup plus puissants et peuvent être exploités sur des épaisseurs allant de 15 à 100 mètres. Les surfaces utilisées par les carrières de roches massives sont donc, d'une manière générale, beaucoup moindres que les exploitations alluvionnaires ayant la même capacité.

2.7. Etudes de contraintes et études de ressources en granulats:

Il a été signalé dans un paragraphe antérieur (2.4) que les études de ressources en granulats amenaient à des choix de zones exploitables, choix procédant évidemment de l'intérêt des gisements de granulats eux-mêmes mais également d'une série d'autres facteurs. Ce sont ces facteurs que nous considérons comme des contraintes susceptibles d'influencer sur la possibilité d'exploiter la ressource. Inversement, dans les études d'aménagement, la présence de ressources en granulats constitue une des données majeures à prendre en considération.

Pour connaître les ressources en granulats réellement exploitables, il convient donc de mener, parallèlement aux études de ressources proprement dites, des études sur les contraintes mais il est nécessaire de ne pas faire de ces études de contraintes un préalable qui conduirait à exclure certaines zones où l'on s'interdirait de chercher l'existence de matériaux. Ce n'est qu'à la fin de chaque étape commune: étude de ressources - études de contraintes que l'on peut délimiter les zones où la prospection doit être poursuivie en excluant éventuellement certaines zones géologiquement favorables.

On ne traitera pas davantage ici du problème de l'articulation des études de ressources et des études de contraintes étant donné le fait que la prise en compte des données du milieu dans le cadre des inventaires de ressources en matériaux doit être étudiée dans un autre travail financé par la taxe parafiscale sur les granulats.

Il est utile cependant d'insister sur le point particulier que constitue la contrainte financière et en particulier sur la notion de gisement exploitable.

Les granulats sont des matériaux de faible coût, de l'ordre de 5 à 20 fr. / tonne, départ - carrière et de 15 à 50 fr. / tonne rendue chantier (valeurs 1978 dépendant d'une part de la nature du matériau et d'autre part de la région considérée). Pour qu'un matériau soit exploitable à un moment donné et pour un marché donné, il est donc nécessaire qu'il puisse être produit et acheminé à un prix au plus égal au prix des matériaux équivalents disponibles sur ce marché. (1)

Dans les études d'inventaire de granulats, il ne s'agit pas de calculer avec précision le prix de revient des matériaux de chaque gisement, mais il est nécessaire de pouvoir faire des comparaisons entre gisements en tenant compte des éléments de coût intervenant dans le prix des granulats rendus au point d'utilisation, notamment:

- les conditions d'exploitation (importance de la découverte, exploitation à sec ou en eau, accès...)
 - les conditions de traitement (propreté du matériau, importance des déchets, problèmes de concassage...)
 - le coût des terrains
 - le coût des mesures a priori nécessaires pour la préservation de l'environnement
 - les coûts de transport
- etc.

Ces éléments de coût doivent être mentionnés aux différents niveaux des études de ressources.

(1) Ceci peut constituer un handicap pour des matériaux de substitution qu'il peut apparaître souhaitable aux Pouvoirs publics de lancer sur le marché en remplacement de ressources dont l'exploitation est la cause de nuisances graves: par exemple la substitution de granulats de concassage à des matériaux dragués en rivière dans certaines zones. En dehors de mesures d'interdiction d'exploiter dans des zones déterminées ou de pénalisation par des taxes de certains matériaux, on ne voit pas quels autres moyens pourraient être utilisés pour favoriser des matériaux de substitution lorsque c'est nécessaire...

3 - METHODES DE PROSPECTION

Ce chapitre est consacré à un panorama des méthodes utilisées pour la prospection des gisements. Toutes ne s'appliquent pas à toutes les phases d'étude, comme nous le verrons dans le chapitre suivant -

3. 1 Prospection des gisements de roches massives :

3. 1. 1 Toute étude de ressources débute par une étude géologique -

Celle-ci commence par un examen des cartes topographiques, géologiques et des photographies aériennes. Celui-ci permet de déceler les secteurs favorables à la présence de gisements et à l'implantation de carrières.

En particulier, l'étude stéréoscopique des photographies aériennes peut indiquer les zones d'affleurement et les excavations de diverses origines.

L'étude géologique est ici grandement facilitée lorsqu'existent des carrières en exploitation ou des fronts de taille anciens accessibles qui permettent de définir :

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

Ces différents éléments permettent de dresser des "cartes géotechniques" des carrières situant les zones saines, altérées, broyées, etc ... sur les différents fronts.

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

L'étude pétrographique, faite sur lames minces, qui peuvent être taillées dans des fragments de très faibles dimensions, (éclats remontés lors de forages au marteau perforateur voir ci-dessous) est essentielle.

L'étude géologique définit donc essentiellement dans ses grandes lignes la pétrographie des gisements. Il reste à en préciser la structure, on fait appel, dans un premier temps aux méthodes géophysiques de surface : électrique et sismique.

3. 1. 2 Les méthodes électriques.

La méthode électrique la plus souvent employée est le trainé de résistivité (à deux longueurs de ligne différentes) les résultats étant présentés sous forme de carte de résistivité entre la découverte, généralement conductrice et le matériau sain, pratiquement isolant. On obtient ainsi une image de l'épaisseur de la découverte, une localisation des zones de faille dans la mesure où leur largeur est importante ; ces données servent souvent de guide aux prospections ultérieures.

Cette méthode ne permet cependant pas en général de déceler la limite roche fissurée - roche saine ni les hétérogénéités locales, en raison du caractère global de la mesure, et de son aspect discontinu. La précision sur l'épaisseur de la découverte reste également insuffisante. Son intérêt principal réside dans la facilité de mise en oeuvre et la rapidité d'exécution. Elle est utile au niveau des études à 1 / 25.000° (cf. 4. 2. 1).

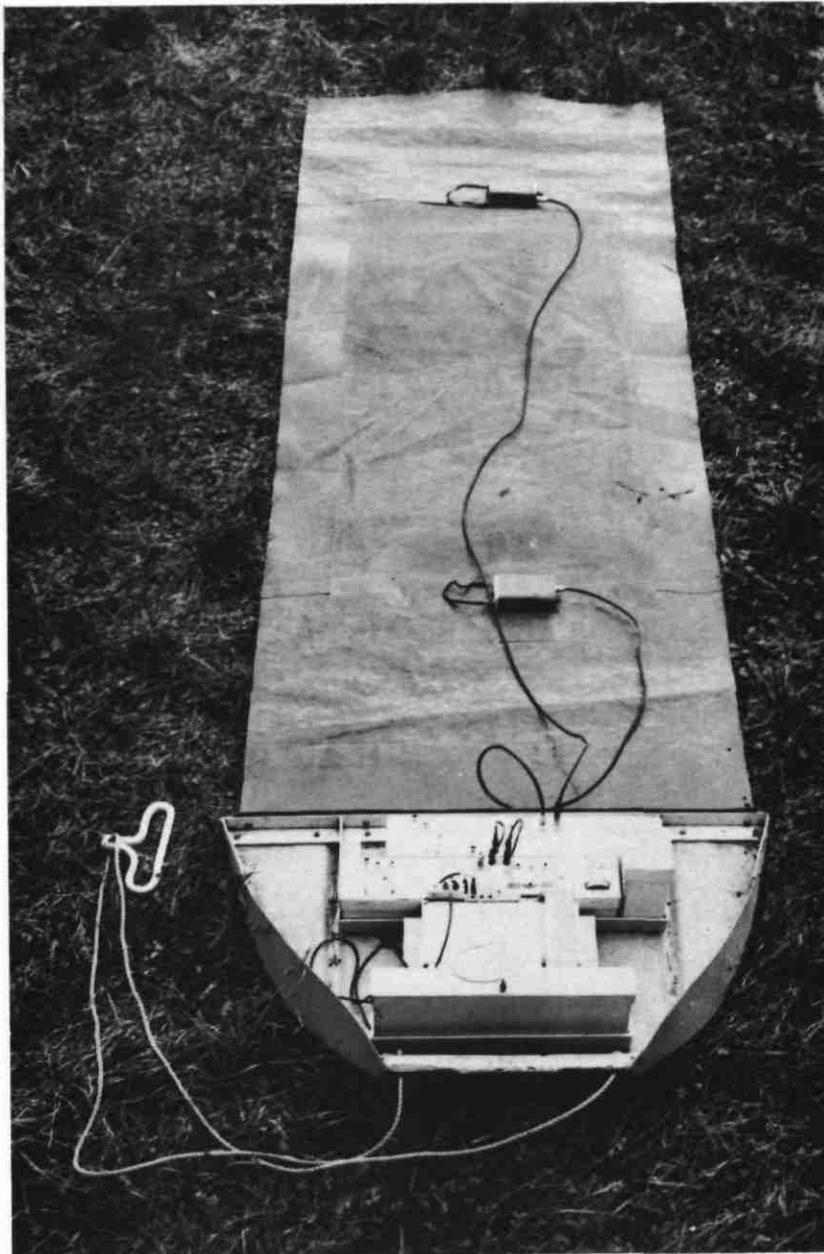
Le sondage électrique qui permet de reconnaître, à des profondeurs successives croissantes, la résistivité des terrains permet, dans certains cas de préciser les données fournies par les trainées de résistivité. Le sondage électrique est à utiliser pour déterminer les longueurs de ligne optimales dans les trainées de résistivité.

On peut également utiliser une nouvelle méthode de mesure de la résistivité : méthode magnéto-tellurique artificielle. Elle consiste à mesurer à la surface du sol les composantes horizontales des champs magnétique H et électrique E créés par des émetteurs radio.

La mise en oeuvre de cette méthode est très simple. Deux électrodes capacitives permettant de mesurer le champ électrique sont implantés sur un traineau en caoutchouc, que l'on peut tirer et faire ainsi une mesure en continu du champ électrique. Comme la mesure du champ magnétique en continu ne pose aucun problème, un module électronique permet de calculer directement le rapport E/H (éventuellement, directement la résistivité) qui est enregistré. Cette méthode présente trois avantages par rapport au trainé de résistivité :

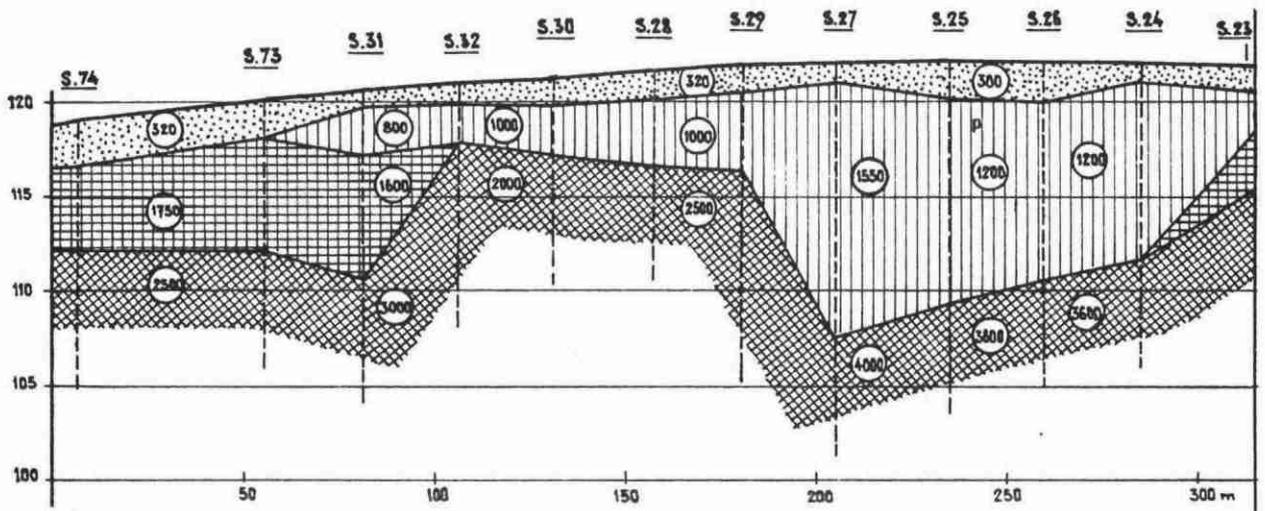
- mesure continue, permettant de mettre en évidence des accidents d'importance moindre,
- rapidité de la mesure, le traineau étant déplacé à la vitesse d'un homme au pas (il peut éventuellement être tiré par un véhicule),
- pouvoir séparateur plus fin,

Des tests de cette méthode sont actuellement en cours pour en préciser les conditions d'utilisation.



Méthode magnétotellurgique artificielle

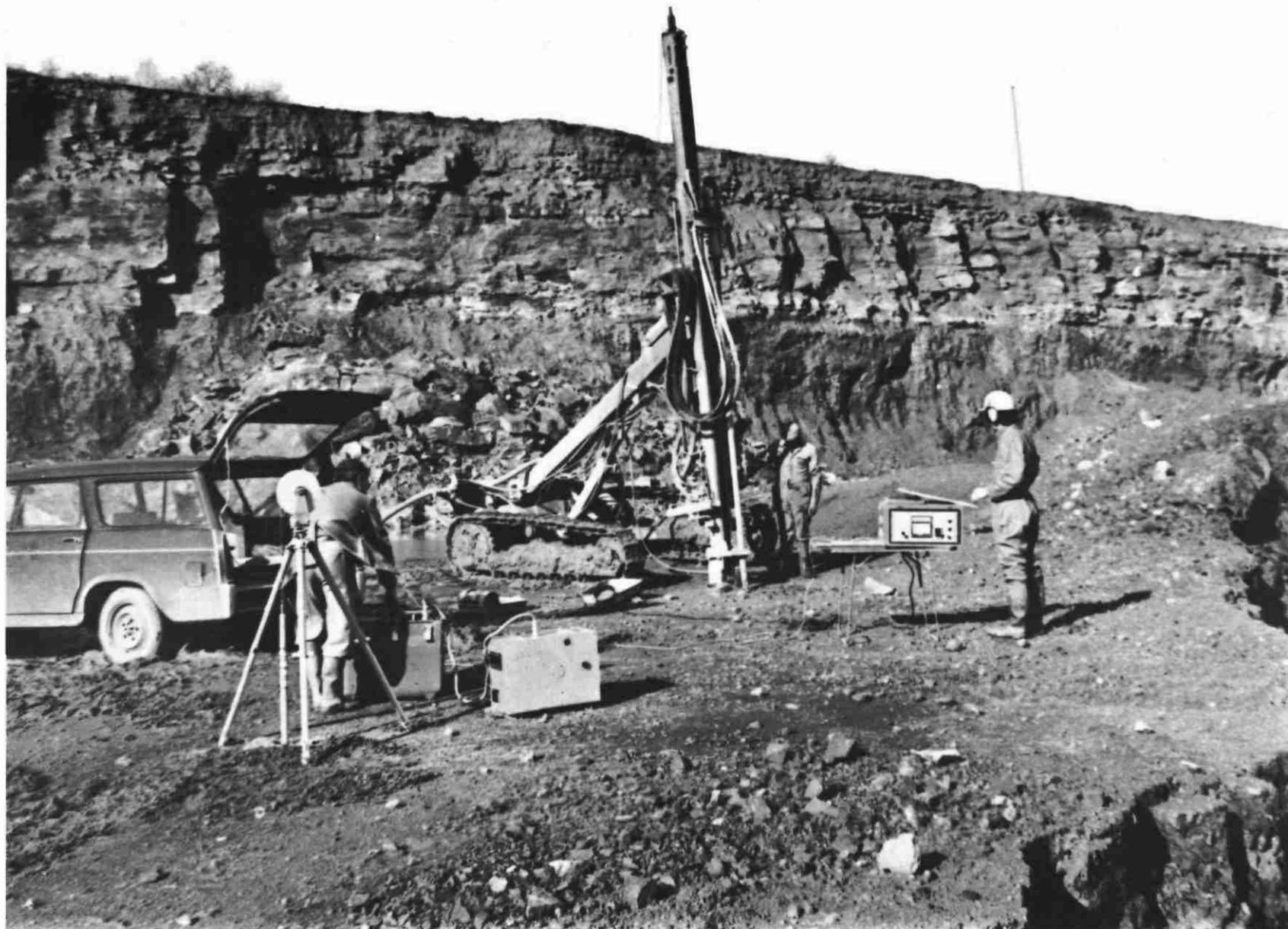
Appareillage



Coupe sismique

- | | | | |
|---|--|---|---|
|  | Vitesse sismique de 300 à 700 m/s
(Découverte : Blocailles enrobées d'argile) |  | Vitesse sismique de 1 600 à 2 000 m/s
(Quartzites saines mais fissurées) |
|  | Vitesse sismique de 700 à 1 600 m/s
(Zone d'altération des quartzites) |  | Vitesse sismique de 2 000 à 4 000 m/s
(Quartzites saines à débit massif) |

*La sismique - réfraction
Exemple de coupe sismique*



Utilisation conjointe du forage au marteau perforateur et de la diagraphie sur une carrière de roche massive

3. 1. 3 La sismique réfraction.

Pour la reconnaissance des sites de roches magmatiques, les enregistrements mettent généralement en évidence trois couches : un terrain de surface à 300 m/s. qui fait partie de la découverte, un terrain à forte vitesse (entre 2000 et 4000 m/s) qui représente généralement le terrain sain, et entre les deux, un terrain à vitesse moyenne (de l'ordre de 1000 - 1500 m/s), difficile à définir, car il peut s'agir, selon le cas, d'un matériau altéré peu fracturé (par exemple arène compacte) ou d'un matériau sain, très fracturé. Cette indétermination ne peut être levée que par des observations ou dans certains cas, par combinaison avec les méthodes électriques. Une difficulté liée aussi à ce terrain intermédiaire est sa mauvaise définition sur les enregistrements qui peut entraîner des erreurs assez grandes sur la détermination des épaisseurs.

Il faut aussi signaler que la vitesse sismique caractérise la compacité du terrain et non sa nature. Ainsi, cette méthode ne permet pas de distinguer des schistes de quartzites par exemple.

Quelle que soit la méthode géophysique utilisée, deux points limitent pour les massifs rocheux, la précision de l'interprétation :

- . Pour les massifs de roches magmatiques, il est difficile de placer la limite découverte roche saine. Les caractéristiques géophysiques (résistivité, vitesse sismique) varient d'une manière continue et la représentation en couches est une schématisation, qui peut conduire à des erreurs,
- . la fissuration des massifs n'est pas isotrope. En général, on peut reconnaître plusieurs directions de fracturation ; les paramètres n'ont pas la même valeur quand ils sont mesurés parallèlement à ces directions, ou perpendiculairement (sauf peut-être par la méthode magnéto-tellurgique artificielle). Il est généralement difficile de faire coïncider les interprétations des deux mesures, pour des épaisseurs calculées, d'où la grande importance de l'étude de géologie structurale préliminaire pour l'implantation des directions de mesure.

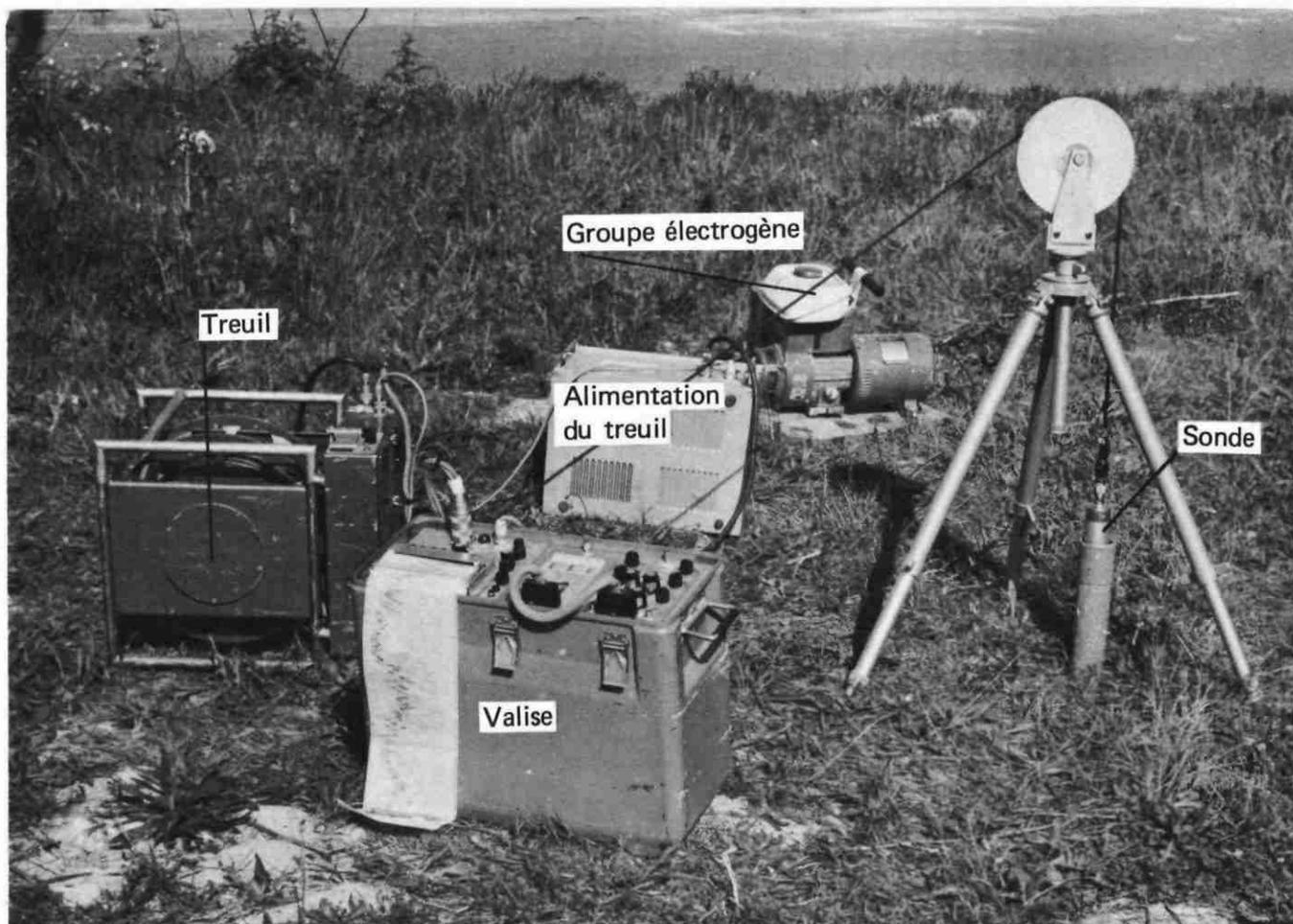
En conclusion, on peut considérer que le rôle de l'étude géophysique est de donner une "image" du gisement qui permet d'implanter plus judicieusement les sondages.

3. 1. 4 Les sondages.

Quand on parle de sondages de reconnaissance, on sous-entend généralement sondage carotté. Ce dernier apporte en effet en général une information excellente : l'échantillonnage continu permet de réaliser des coupes géologiques très précises (accompagnées d'identification pétrographique), d'étudier la fracturation et de faire des essais mécaniques. Mais ces sondages carottés sont très lents à réaliser et donc très onéreux. Pour rester dans une enveloppe de coût raisonnable, il est donc nécessaire de limiter leur nombre, en les réservant généralement aux cas où il est indispensable de visualiser la roche (cas de gisements neufs). Or, l'étude d'un gisement suppose un nombre important de sondages de reconnaissance. Pour lever cette contradiction, il faut faire appel à un autre moyen de forage. Le seul qui existe et qui corresponde à ces critères de coûts est le forage au marteau perforateur (celui-ci se trouve d'ailleurs dans les carrières en cours d'exploitation). Le problème posé est donc d'obtenir des renseignements géologiques sûrs et précis à partir de forages destructifs rapides.

Les différentes étapes de l'étude sont les suivantes :

- a) suivi de l'exécution du forage : c'est la base de l'interprétation globale des résultats et il doit être fait avec le plus de précision possible. Il est important que la coupe soit relevée par un géologue averti, car il y a lieu de faire, non seulement des observations visuelles mais aussi d'essayer d'interpréter les variations ou apparitions nouvelles ou imprévues de faciès ou même prévoir les variations ou les différentes anomalies. Il faut donc observer tout ce qui se passe au moment du forage (couleur et aspect de la poussière, taille des éclats, abondance en éléments fins et en éclats, variation de la vitesse d'avancement du taillant, bruit du taillant de la roche, régularité dans la remontée des éclats), et procéder à des prélèvements particulièrement nombreux dans les zones douteuses. La récupération des matériaux est relativement simple, par prélèvement au minimum une fois tous les 50 centimètres, des éclats et poussières. Après passage sur un tamis, une certaine quantité d'éclats de dimension supérieure à 2 mm sont lavés pour examen pétrographique. L'opérateur doit observer les éclats, sans s'attacher uniquement au plus gros, et noter les variations de pétrographie, d'altération, de couleur et la présence de pollution.



Le matériel de diagraphe

Le géologue dresse ainsi ce qu'on appelle la "coupe sondeur". Elle ne peut pas être dans tous les cas d'une précision parfaite. En effet, entre l'observation faite en surface et la récupération des éclats, il peut se produire un décalage dû au temps de remontée des éclats. Différentes observations permettent de penser qu'en trou sec, ce décalage est progressif, en fonction de la profondeur, et dépend de la puissance du soufflage.

Il y a lieu de conserver les éclats qui pourront par la suite, être examinés en laboratoire, ou faire l'objet d'essais mécaniques telle la fragmentation dynamique. En effet, l'identification, au moment du forage proprement dit, peut être trop hâtive et entraîner des erreurs d'appréciation. Au cours de la mise à jour de la coupe sondeur, il est alors fort utile de réexaminer ces éclats à la loupe binoculaire ou en lames minces.

b) La vitesse d'avancement.

Il est procédé, lors de la réalisation de la coupe sondeur, à des mesures systématiques de la vitesse d'avancement de l'outil.

La mesure consiste à chronométrer le temps mis par la perforatrice pour forer une longueur donnée. Les dépouillements graphiques ont montré que le temps mis pour forer 50 centimètres était à retenir pour plusieurs raisons (rapidité du dépouillement, précision suffisante, facilité du chronométrage).

Les mesures peuvent être faites automatiquement, permettant un allègement notable du travail, lors du suivi des forages, et une précision beaucoup plus grande des mesures.

La vitesse d'avancement est fonction des terrains traversés et de la perforatrice utilisée. Dans une même carrière, il est donc préférable d'utiliser toujours la même perforatrice et si possible le même technicien sondeur. Elle doit être aussi interprétée avec précaution.

3. 1. 5 Les diagraphies.

Les diagraphies consistent à enregistrer le long d'un sondage d'une manière continue, en fonction de la profondeur, un paramètre du sol qui peut être sa radioactivité naturelle, sa résistivité, sa masse volumique, sa teneur en eau, etc ...

a) Matériel -

L'appareil couramment utilisé comprend un treuil électrique à vitesse régulée de 0,5 à 5 m/mn, un câble à 4 conducteurs et un enregistreur bi-trace, dont le mouvement du papier est asservi au mouvement du câble- pour donner des échelles d'enregistrement de 1/50 à 1/100.

Il permet de faire les mesures suivantes :

b) Radioactivité naturelle :

Elle est due à la présence d'éléments radioactifs : K40, U238 et Th232. La quantité de ces éléments dépend de la composition chimique et minéralogique de la roche. La mesure s'effectue à l'aide d'une sonde de 27 mm de diamètre qui comprend un cristal et un photomultiplicateur. On peut donc espérer séparer des faciès pétrographiques différents, à condition que l'épaisseur des bancs soit supérieure à 30 cm.

L'enregistrement s'effectue en général à la vitesse de 1 m/mn. La sonde peut être mise en oeuvre indifféremment dans un forage nu ou tubé, vide ou plein d'eau, grâce au pouvoir de pénétration élevé des rayons γ . La mesure peut être améliorée par l'utilisation d'une sonde sélective, qui discriminera les différents éléments radioactifs.

c) Résistivité -

La mesure se fait à l'aide d'une sonde "laterolog", pour avoir une définition fine des couches (on peut mettre en évidence des couches centimétriques conductrices dans un ensemble résistant). Il faut noter que les mesures peuvent être utilisées pour réinterpréter les prospections électriques de surface. Les faibles résistivités correspondent soit aux zones altérées, soit aux zones fissurées.

L'emploi du "laterolog" impose que le sondage soit rempli d'eau ou de boue, non tubé ou tubé par un tube plastique fortement crépiné. Dans les massifs de roches magmatiques, cela ne pose pas de gros problèmes, contrairement aux massifs calcaires. La mesure peut s'effectuer très rapidement, la vitesse de remontée étant de l'ordre de 3 m/mn.

d) Vitesse du son -

Elle peut être mesurée, soit d'une manière continue (base de mesure de la vitesse 20 cm.) dans un forage rempli d'eau, soit point par point dans un forage sec (base de mesure 30 ou 60 cm). Dans ce cas on perd naturellement une partie de la définition.

La mesure ainsi faite permet d'apprécier la fissuration du milieu. Cette diagraphie est bien corrélée à celle de la vitesse d'avancement, mais elle a l'avantage de fournir une donnée quantitative et de ne pas dépendre de l'engin de forage.

e) On peut aussi utiliser la sonde γ - γ qui mesure la masse volumique, mais sa précision pour des valeurs voisines de 2, 7 est insuffisante pour étudier la fissuration, et la sonde neutron-neutron qui théoriquement mesure la teneur en eau, mais qui dans notre cas est surtout sensible à la composition chimique (présence de fer par exemple) et donne donc des résultats complémentaires de la radioactivité naturelle.

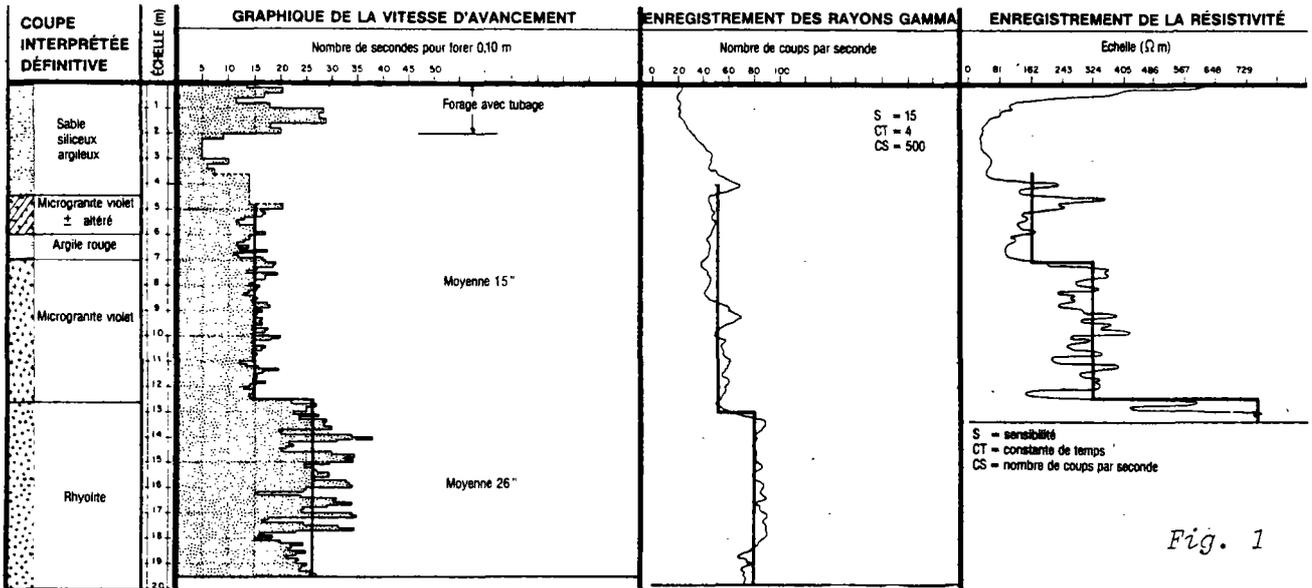


Fig. 1

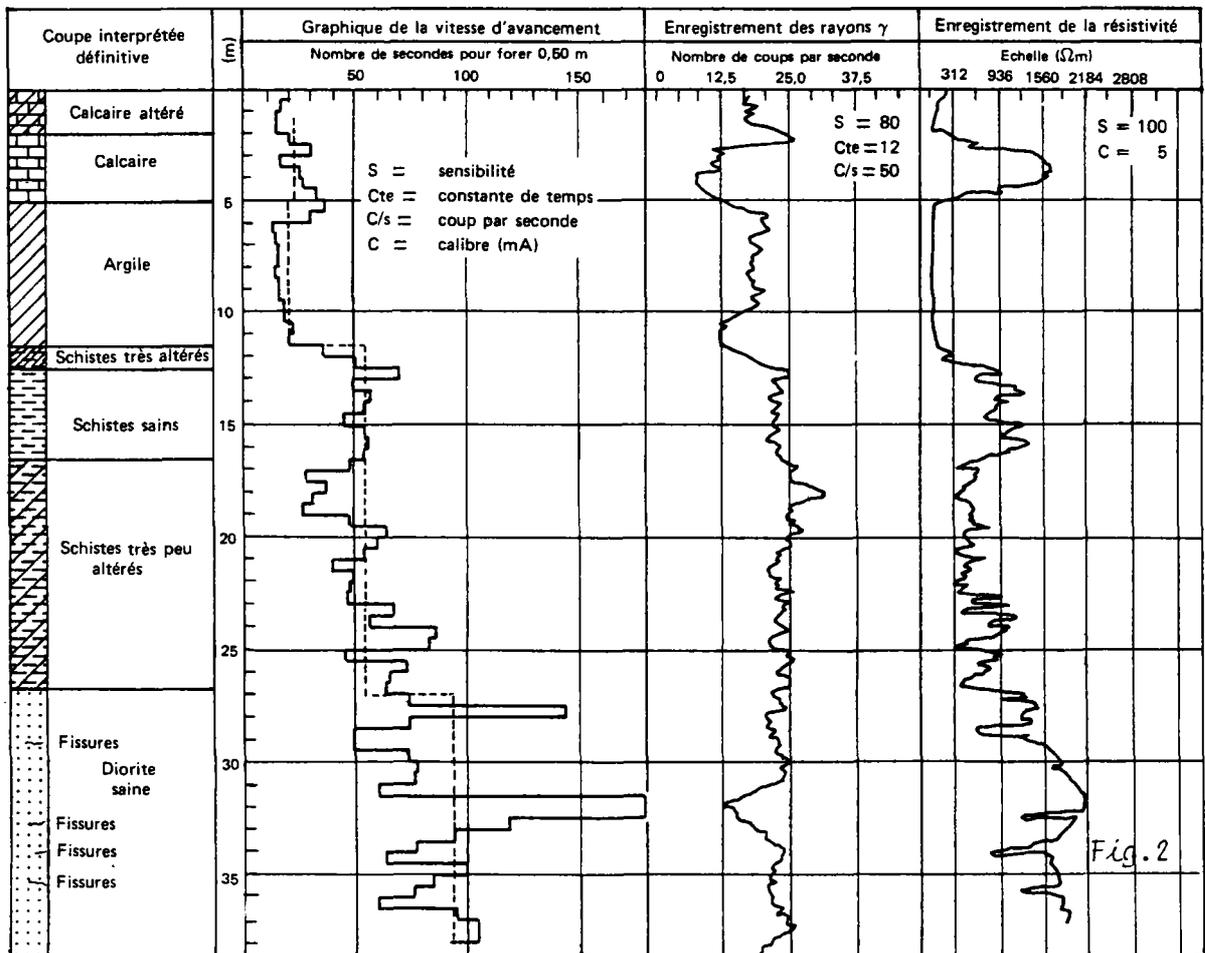


Fig. 2

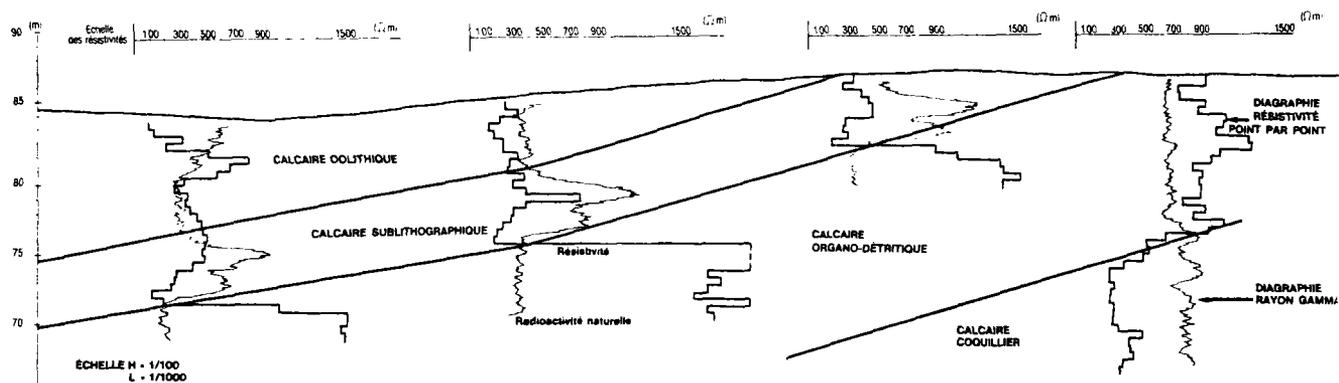


Fig. 3 Géométrie d'un gisement déterminée grâce à un niveau marqueur de radioactivité

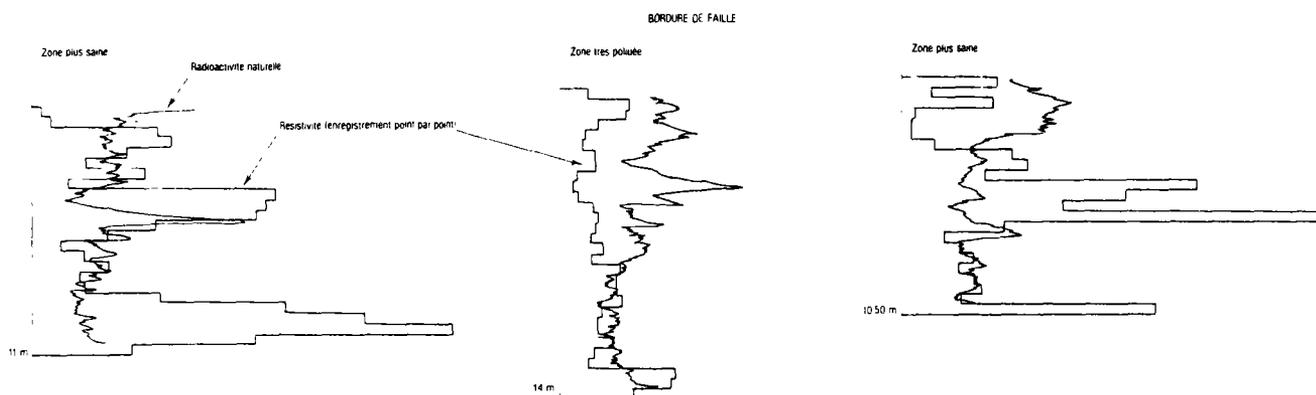


Fig. 4 Pollution argileuse décelée par le log de résistivité.

f) Résultats -

Il est difficile de dresser un tableau qui résumerait les cas où telle méthode est la plus efficace, le problème étant non pas de faire des mesures quantitatives, mais de distinguer plusieurs faciès.

Quelques exemples permettent d'apprécier les résultats obtenus :

- sur la figure 1 l'enregistrement de radioactivité naturelle permet de distinguer parfaitement le microgranite de la rhyolite et confirme ainsi l'enregistrement de la vitesse d'avancement. La résistivité définit mieux la zone intermédiaire.

- sur la figure 2 par contre, si la diagraphie de radioactivité naturelle permet de distinguer correctement une partie de la découverte (calcaire et argile), elle ne différencie pas les schistes des diorites, la résistivité fait apparaître la différenciation entre ces deux faciès.

Pour les gisements calcaires, l'on rencontre généralement un ou plusieurs niveaux marqueurs de la radioactivité, permettant entre autre de déterminer, par corrélation entre sondages, la géométrie du massif. De plus, l'altération superficielle et la pollution par bancs, poches ou fissures, sont en général, bien mises en évidence. Ainsi, sur la figure 3, à partir des log rayon γ , il est possible d'établir la géométrie du massif.

Les enregistrements de résistivité sont généralement beaucoup plus contrastés que ceux de radioactivité naturelle et leur interprétation est ainsi facilitée (fig. 4). Des valeurs de résistivité élevées sont pratiquement toujours synonymes de roches saines. Par contre on ne peut rien dire sur les valeurs faibles ; l'examen des éclats permet de lever l'indétermination altération - fissuration.

Ces quelques exemples montrent à l'évidence la diversité des cas que l'on peut rencontrer et aussi l'impossibilité dans laquelle on se trouve souvent de savoir à priori quelles sont les sondes qui différencieront le mieux les différents faciès sur une carrière. Comme il n'est pas question de passer successivement toutes les sondes, on étudie leur pouvoir discriminant sur deux ou trois forages étalons (c'est à dire parfaitement étudiés au point de vue des éclats). Il faut noter qu'actuellement les deux diagraphies de radioactivité naturelle et de résistivité, complétées par l'enregistrement de la vitesse ont toujours permis de résoudre le problème posé, c'est à dire de préciser la coupe sondeur.

La diagraphie est aussi dans ce sens une assurance ; elle permet de savoir si tous les faciès ont été ramenés sous forme d'éclats (ce qui n'est pas évident par exemple dans le cas de bancs fins argileux intercalés dans un massif calcaire), et si le géologue les a tous identifiés dans le bon ordre (cas du mélange des éclats lors du suivi du sondage).

La synthèse des résultats (coupe sondeur, diagraphies, examen des éclats en laboratoire) permet de dresser la coupe géologique définitive du sondage, avec une précision pratiquement équivalente à celle d'un sondage carotté.

Il est important que les études soient faites avant tout dans l'optique de l'évaluation des matériaux. Il ne faut jamais perdre de vue qu'il faut donner au carrier un outil de travail lui permettant d'exploiter au mieux un gisement.

Pour celà, il est souhaitable de bien repérer les faciès géotechniquement différents, d'apprécier les variations d'épaisseur de la découverte, de donner le maximum d'informations permettant d'orienter les fronts d'extraction.

Les méthodes décrites ci-dessus permettent d'effectuer ces reconnaissances de façon efficace et pour des coûts raisonnables.

3. 1. 6 Les essais et identifications

Les essais utilisés dans le cadre d'études de ressources doivent, sauf exception, rester relativement simples, leur but étant de "situer" les matériaux par rapport aux autres ressources de la région et surtout en fonction des diverses utilisations possibles. Tout "essai de comportement" du matériau devra être précédé par une bonne identification de ce dernier.

Cette identification comporte :

- l'étude pétrographique sur lames minces -

Le coût de fabrication des lames étant faible, il ne faut jamais hésiter à en réaliser un grand nombre - (ceci est particulièrement vrai pour les études à des échelles où les moyens géophysiques ou de sondages sont très réduits).

- Masse volumique apparente,

- Porosité,

- Analyse chimique pour les carbonates
(CO_3 Ca, CO_3 (Ca, Mg), Si O_2).

Les essais "mécaniques" comportent essentiellement :

- L'essai Los Angelès qui peut être partiellement remplacé après étalonnage par l'essai de fragmentation dynamique.
- Essai Micro Deval en présence d'eau (M.D.E.).

Pour ces deux essais, qui rendent compte approximativement d'une part de la fragilité et d'autre part, de la résistance à l'usure des granulats, des seuils de valeurs ont été fixés dans toutes les spécifications relatives aux granulats routiers et aux granulats à béton. Ils sont donc indispensables pour "situer" les matériaux étudiés.

D'autres essais peuvent être réalisés en fonction, soit des utilisations prévues, soit de problèmes particuliers. Citons, parmi les plus courants :

- . Résistance à la compression, module de déformation, vitesse de propagation des ondes longitudinales, Deval sec, coefficient de polissage accéléré, abrasivité, essais d'altérabilité, essai d'aplatissement, -

3. 2. Prospection des gisements de roches meubles :

Dans le domaine des gisements alluvionnaires, toute schématisation est difficile, en raison des particularités locales de chaque vallée. Il est cependant possible, comme pour les gisements de roches massives, de rappeler les méthodes d'étude employées. La plupart d'entre elles étant également utilisées pour la prospection des roches massives, quoique de façon différente, cette description sera plus brève que celle du chapitre précédent.

3. 2. 1 Utilisation des photographies aériennes et topographie:

L'utilisation des documents existants est, dans un premier stade, très précieux : photographies aériennes au 1 / 25.000 - 1 / 30.000° (couverture complète de la France à l'I.G.N.) et cartes topographiques au 1 / 25.000 ou 1 / 20.000°. L'analyse détaillée de ces deux documents (morphologie, toponymie, interprétation photogéologique) permet, et celà d'autant mieux que l'on connaît déjà le cours d'eau, de situer les anciens chenaux même totalement abandonnés, les limites de terrasses, etc...

Un nivellement très précis peut également être très utile au niveau de l'étude détaillée d'un gisement en fournissant des indications morphologiques difficilement décelables à l'oeil sur le terrain.

3. 2. 2 Géophysique - Résistivité:

La technique utilisée pour la prospection des gisements alluvionnaires est généralement celle du traîné de résistivité avec, selon les gisements, une ou plusieurs longueurs de ligne. Les mailles à utiliser varient selon les contextes. (voir ci-dessous)

Intérêt de la méthode : rapide et discrète (matériel peu encombrant et d'un coût très faible), elle permet toujours, lorsqu'elle est mise en oeuvre de façon correcte, d'avoir une bonne définition de la découverte du gisement tout en nécessitant un étalonnage par des sondages mécaniques.

Limites de la méthode : lorsque les sites sont très complexes (schémas à trois ou quatre terrains, avec mauvais contrastes), on ne peut espérer identifier que la découverte ; des conclusions extraites des données obtenues à partir des grandes longueurs de ligne (> 20 m) restant alors sujettes à caution, même lorsqu'un bon étalonnage par sondages a été fait au préalable.

La méthode par sondages électriques, quoique plus onéreuse et d'interprétation quelquefois délicate peut être utile dans quelques cas particuliers. Le "semi-sondage électrique" avec 4 ou 5 longueurs de ligne étant souvent la solution la plus intéressante.

3. 2. 3 Géophysique - Sismique - Réfraction:

Plus rarement utilisée, elle ne peut convenir que lorsque le substratum est bien contrasté (calcaire dur par exemple), et que la vitesse du son y est plus élevée que dans les graves. Par ailleurs, lorsque les gisements sont noyés, il faut veiller à bien connaître la cote de la nappe avant les essais ; dans tous les cas, cette méthode ne peut donner que l'épaisseur totale du matériau meuble et parfois seulement la limite découverte-graves.

3. 2. 4 Géophysique : magnétotellurique artificielle (M.T.A.) :

Cette méthode a été décrite ci-dessus. Elle doit pouvoir être utilisée en gisements alluvionnaires de façon très efficace pour la définition de la découverte.

3. 2. 5 Sondages :

3. 2. 5. : Sondages rapides avec prélèvements non représentatifs.



V. P. R. H.
(Vibration - Percussion Rotation Hydraulique)

Fig. 5

Ce sont en général des sondages en diamètre relativement faible (< 200 mm et souvent < 100 mm).

Différents matériels sont utilisables

- tarière continue
- vibro-fonçage (V.P.R.H. par exemple) permettant de réaliser des prélèvements hors d'eau ou sous l'eau
- tarière simple (type Highway): valable pour les gisements hors d'eau pour lesquels elle permet de définir à la fois l'aspect quantitatif et qualitatif (profondeur limite d'investigation 6 m pour les tarières les plus répandues)
- tarière simple équipée d'un piège à graves: ce procédé permet de récupérer des échantillons valables même en site noyé
- carottier battu.

Intérêt de la méthode : procédé rapide (de 5-6 m à 12 m/h) permettant de préciser de façon correcte la géométrie du gisement (limites découverte-graves et graves-substratum à 20 à 50 cm près) et par là même d'étalonner les mesures de résistivité. Il est en outre possible d'avoir une idée approximative de la nature des matériaux traversés et même une bonne connaissance du matériau lorsque celui-ci a une granularité assez fine (sables, argiles).

Depuis quelques années, on utilise également en liaison avec les méthodes de sondage rapide, l'enregistrement de la radioactivité naturelle dans le trou de sondage (voir ci-dessus - diagraphies). Dans ce cas, on choisit la méthode de forage la plus rapide possible (12-15 m/h), donc la moins coûteuse. La sonde de radioactivité naturelle est descendue directement dans le train de tiges. Les enregistrements permettent d'obtenir, de façon précise et pour un coût réduit, les limites découverte-graves et graves substratum, ainsi que les intercalations argileuses ; une interprétation quantitative des enregistrements doit permettre à terme de chiffrer approximativement la pollution argileuse du gisement.

Limites de la méthode : bien que relativement peu coûteux, les sondages rapides avec ou sans diagraphie doivent cependant être utilisés à bon escient, en évitant tout maillage systématique à priori. Leur utilisation doit bien s'intégrer à l'ensemble de l'étude. Par ailleurs, il faut signaler qu'ils peuvent être totalement inutilisables dans les gisements contenant de façon courante de très gros éléments (> 200 mm), ce qui est le cas par exemple pour de nombreux dépôts glaciaires ou fluvio-glaciaires.

3. 2. 5. 2 Autres méthodes légères :

Dans certains cas, on peut utiliser des méthodes légères qui s'apparentent à des sondages. Par exemple, la canne à sonder permet de mesurer l'épaisseur de la découverte lorsque celle-ci est peu compacte. Le pénétromètre peut également présenter un intérêt pour évaluer l'importance du recouvrement.

3. 2. 5. 3 Autres sondages :

Nous regroupons sous ce nom, les sondages effectués essentiellement pour obtenir des courbes granulométriques représentatives ;

leur nombre peut être extrêmement variable selon le contexte (type de gisement) et fonction des autres moyens utilisés dans l'étude (géophysique - sondages rapides).

Hors d'eau, on dispose essentiellement de :

- pelle hydraulique : elle permet de réaliser des tranchées, de remonter des quantités de matériaux tout à fait suffisantes, même pour les très grosses graves. Les tranchées ont en outre l'avantage de présenter une coupe visible du gisement. Le seul inconvénient est une profondeur limite pratique de l'ordre de 8 m. Ce procédé est indispensable lorsque l'on veut faire des essais de traitement (concassage - criblage) pour réglage des installations ;
- tarières simples (\emptyset 600 à 700 mm) : les prélèvements sont en général représentatifs ($D < 100$ mm), la précision des limites assez bonne (20 à 50 cm), la profondeur limite pratique de l'ordre de 11 - 12 m.

Ces deux moyens sont rapides : 40 à 150 m/jour

Pour les graves noyées, aucun procédé ne donne actuellement entièrement satisfaction. Certains, relativement rapides, manquent de précision ; d'autres plus valables sur le plan de la représentativité de l'échantillon sont très lents et donc très coûteux :

- tarière continue en gros diamètre (\approx 400 mm) : l'enfoncement se fait normalement et le matériau est remonté par arrachage (sans rotation). Ce procédé convient à certains types de graves dont la courbe et la cohésion sont telles qu'une quantité suffisante de matériau (y compris les gros éléments) reste sur les spires. Le prélèvement est rapide, mais limité à 4-5 m de profondeur, en 400 mm de diamètre (difficultés d'arrachage) et à diamètre maximum de 100 mm pour les graves.

Cette méthode peut être utilisée jusqu'à 6-7 m de profondeur avec une tarière de 200 mm, mais elle ne convient alors qu'aux graves ayant un $D < 50$ mm ;

- trépan-benne type Benoto, forage à la soupape.
Ce sont les moyens les plus couramment utilisés. Les prélèvements sont en général corrects, exception faite pour une certaine perte de fines, voire de sable fin dans les deux méthodes. Il faut cependant noter que ce "dessablage" correspond assez bien à ce qui se passe lors de l'extraction. Les diamètres utilisables permettent de prélever à peu près tous les types de graves, sans limitation de profondeur ;

L'inconvénient majeur et souvent très contraignant de ces méthodes est leur lenteur (6-10 m/j) et donc leur coût qui oblige à les utiliser avec parcimonie.

- vibro-fonçage (type VPRH - fig. 5). Ce procédé permet de prélever des graves noyées dans des conditions qualitativement analogues à celles du trépan-benne, mais à un rythme nettement plus élevé (40-60 m/j).

L'enchaînement de ces méthodes, les mailles retenues dépendant évidemment du type et de l'étendue du gisement, des connaissances antérieures, du stade de l'étude (choix du gisement dans une zone donnée ou étude détaillée d'un gisement en vue de son exploitation (voir chap. 4).

3. 2. 6 Essais et identifications:

Les trois principales caractéristiques qu'il faut prendre en compte pour les matériaux meubles sont : la granularité, les caractéristiques pétrographiques et mécaniques des éléments constitutifs, la propreté. Cette dernière dépend en fait de la composition minéralogique et du pourcentage de fines, mais comme elle est souvent traitée à part dans le domaine des applications techniques, nous la séparerons donc des 2 autres.

3. 2. 6. 1 Granularité :

L'essai ne pose pas de problèmes particuliers entre 50 μ et 20 mm. Il est réalisé sous eau sur des colonnes de tamis à mailles carrées, Le résultat est fourni sous forme de courbe cumulative des tamisats cumulés.

Au-dessous de 50 μ , les techniques utilisées changent (voir ci-dessous § 3.2.6.3 Propreté).

Au-dessus de 20 mm, le problème ne provient pas du matériel car il existe des tamis jusqu'à 100 mm, mais de la quantité de matériau nécessaire pour réaliser une granulométrie représentative. La règle des 200 à 600 D ne conduit en effet pour une grave 0-50 mm qu'à 10 kg à tamiser. En fait cette règle devient de moins en moins valable quand on dépasse 20 mm. Les calculs montrent en effet que l'erreur commise sur les tamis de 50 mm avec la règle des 600 D est très importante et l'écart type est également très important, ce qui signifie que pour les graves, dont le D, est supérieur à 50 mm, il faut trouver d'autres solutions que le tamisage en laboratoire. Sur les fronts de taille qui s'y prêtent, on peut appliquer la méthode linéaire de Cailleux, sinon il faut travailler après saignées verticale sur une grande quantité de matériaux et en évaluer les éléments supérieurs à 50 mm ;

cette solution implique l'utilisation de bascules et de toles perforées et donc un travail manuel important sur le terrain.

3. 2. 6. 2 Pétrographie - Minéralogie - Caractéristiques mécaniques des matériaux :

L'examen des matériaux doit être fait soit à l'oeil, soit à la loupe binoculaire, et complété, si besoin est, par des lames minces pour identification au microscope polarisant. Il doit s'effectuer sur les différentes classes granulaires, en choisissant des coupures relativement proches (par exemple : 100-200 μ , 200-500 μ , 0,5-1 mm, 1-2 mm, 2-5 mm, 5-10 mm, 10-20 mm, 20-50 mm, > 50 mm).

Les comptages, pour être significatifs, doivent porter sur au moins 200 éléments par classe granulaire. Ceci signifie qu'il peut être bon d'effectuer les comptages sur les classes grossières (> 50 mm) sur le terrain. L'identification devient difficile au-dessous de 50 à 100 microns. Il est utile, dans le cas des graves calcaires ou silico-calcaires, de réaliser sur les fines, une calcimétrie, la teneur en éléments carbonatés revêtant une grande importance, en particulier pour les liaisons entre liants et granulats (ciment, laitier, etc...). Il est bien entendu également que l'analyse pétrographique ne devra pas rester trop vague ("calcaires" par exemple), mais essaiera le plus possible de préciser les nuances, surtout si ces dernières sont importantes (calcaires "lithographiques" et craie par exemple). (Biblio. N°).-

Les essais "mécaniques" découleront directement de l'étude pétrographique. Les essais "gravillons" sont les mêmes que ceux énumérés ci-dessus en § 3.1.6. Les résultats sont cependant à utiliser avec plus de prudence, sauf pour les matériaux dont le D est inférieur à 30 mm, qui ne subissent généralement qu'un criblage. Les matériaux plus grossiers par contre, sont souvent concassés et réintégrés dans les classes granulaires commerciales. Il faut donc en tenir compte. Par ailleurs, les résultats des essais Micro-Deval sur des matériaux très roulés sont également à interpréter avec prudence car généralement trop optimistes en ce qui concerne la résistance à l'abrasion.

Aux essais "gravillons" s'ajoute maintenant un essai de friabilité pour les sables. Cet essai est très important, dans la mesure où il s'agit du seul essai mécanique permettant des comparaisons sur les comportements des différents types de sables.

3. 2. 6. 3 Propreté :

A travers cette notion, ce qui est pris en compte, c'est à la fois la nature et la composition minéralogique des fines. Les essais qui permettent de les préciser, sont :

- . la granulométrie des fractions fines : la méthode la plus couramment utilisée est celle du densimètre. Il faut savoir qu'elle n'est valable que pour préciser la teneur en éléments inférieurs à 2 microns, mais ne rend pas compte correctement de la courbe granulométrique vers les éléments plus fins. Les méthodes dites "à la pipette" donnent de très bons résultats, mais sont longues à mettre en oeuvre. Le granulomètre à laser donne de très bons résultats rapidement, mais l'investissement est lourd.

- . l'équivalent de sable donne des indications précieuses à la fois sur la quantité et la qualité des fines contenues dans le matériau.
Cet essai peut être utilement complété, voire remplacé, par le nouvel essai au bleu de méthylène, qui rend compte globalement du pourcentage et de la nature des argiles contenues dans le matériau. Ce sont précisément ces derniers minéraux qui entraînent le plus de désordres lorsqu'ils ne sont pas éliminés lors de l'élaboration.

- . lorsque les essais précédents laissent penser que la fraction fine contient une quantité non négligeable d'argile particulièrement "nocive" (type montmorillonite par exemple), il peut être utile d'avoir recours à l'identification aux Rayons X.

D'autres essais peuvent être réalisés de façon plus sporadique (pour contrôle) ou au contraire de façon systématique dans certains gisements : teneur en matières organiques, teneur en sulfures (pyrite en particulier).

4- MOYENS A METTRE EN OEUVRE AUX DIFFERENTS NIVEAUX D'ETUDE

Les objectifs poursuivis et la précision recherchée dépendent des problèmes posés, mais on a vu (§ 2-4) qu'en ce qui concerne les moyens à utiliser dans les études de ressources en granulats, on pouvait se ramener à trois niveaux d'étude:

- Le niveau général correspond à des cartes à l'échelle d'environ 1/100 000 (de 1/50 000 à 1/200 000). Il concerne une région, un bassin, un département.
- Le niveau moyen correspond au stade B: définition de zones favorables à l'exploitation et au stade C: délimitation de secteurs exploitables avec des échelles respectivement de 1/25 000 et 1/10 000. Ces deux stades ont été regroupés parce que les moyens d'étude à mettre en oeuvre sont les mêmes. Cependant, la densité des observations, des mesures géophysiques, des sondages est nettement plus grande au stade C qu'au stade B. Les superficies concernées sont, d'une part, les aires de S.D.A.U. ou de schéma directeur équivalent dans lequel une orientation de l'utilisation des sols est indiquées et, d'autre part, les aires de P.O.S. dans lesquels l'affectation des sols est prescrite.
Pour ce qui concerne les zones d'exploitation et d'aménagement coordonnés, la précision des études devra atteindre au minimum celle du stade C. Elle pourra même être plus grande si les contraintes d'aménagement à l'issue de l'exploitation sont rigoureuses.
- Le niveau détaillé correspond à des échelles comprises entre 1/2 500 et 1/1 000 et concerne l'étude du gisement en vue de son exploitation. Ce stade d'étude est normalement à la charge de l'exploitant, mais étant donné qu'il est nécessaire à une bonne conduite de l'exploitation, donc à un réaménagement correctement programmé, il est intéressant de donner quelques idées sur les méthodes souhaitables à ce niveau, bien que les études ne soient pas prises en charge par la taxe parafiscale...

On trouvera en annexes des exemples de devis d'opération qui indiquent les moyens mis en oeuvre dans les différents cas.

4.1. Niveau général: études à 1/100 000.

A cette échelle l'enchaînement des études est approximativement le même pour les roches massives et pour les matériaux meubles (sables et graviers alluvionnaires ou non). Certaines façons d'utiliser les méthodes et les essais d'identification varient d'un cas à l'autre, nous le signalerons dans le cours du texte.

4.1.1. Compilation de toutes les données existantes:

Rappelons que même à ce niveau les études de contraintes doivent être menées en parallèle avec les études de granulats. La compilation doit être très soignée, car il est très rare qu'on ne dispose pas en France de beaucoup plus de données qu'on ne le croit au premier abord:

- cartes géologiques à 1/80 000 ou à 1/50 000,
- cartes géologiques ponctuelles et souvent plus précises réalisées pour des travaux comme les thèses,
- bibliographie complète (documents, archives, études réalisées par les différents organismes publics ou privés).
- inventaire des sondages réalisés dans le secteur d'étude pour tous usages (dépouillement nécessaire, dont l'interprétation est parfois délicate - Banque du sous-sol.-)

4.1.2. Etude géologique, avec les moyens légers à la disposition du géologue: photographies aériennes, cartes topographiques, cartes géologiques et étude sur le terrain.

a) pour l'étude d'un bassin alluvionnaire, il est indispensable de disposer d'une cartographie, même sommaire des bassins versants, dans la mesure où ce sont eux qui ont alimenté les alluvions déposées par les cours d'eau. Pour les formations sédimentaires (calcaires, sables par exemple), une reconstitution paléogéographique des niveaux intéressants est toujours très fructueuse. Elle permet de situer les grandes variations de faciès (passages latéraux calcaires - marnes par exemple), ou une évolution granulométrique progressive (sables marins, en fonction de la distance au rivage, par exemple). Pour les roches éruptives et cristallophylliennes ce sont les différenciations pétrographiques et notamment la texture de la roche qu'il est intéressant de connaître.

b) l'étude géomorphologique réalisée sur photographies aériennes et sur le terrain apporte également des données précieuses: on dispose en France de la couverture photo-aérienne noir et blanc complète à 1/30 000 environ. Dans certains cas, si les photographies ont une qualité insuffisante (mauvaise période de prise de vues par exemple), une couverture spéciale peut être réalisée. Le coût n'en est pas élevé, si l'on choisit la solution légère qui consiste à utiliser un petit avion. Les photographies obtenues ne peuvent évidemment pas servir à des photo-restitutions, mais répondent souvent bien au problème posé, surtout si l'on utilise 2 ou 3 émulsions (panchromatique + infrarouge et couleurs par exemple). Pour les plaines alluviales, la différenciation entre basses terrasses et alluvions récentes par exemple est généralement facile sur photographies (en particulier prises de vue obliques), les alluvions récentes plus fines ayant un pouvoir de rétention de l'eau et une ascension capillaire plus importante, qui accentue l'humidité et favorise une végétation différente. Pour les roches massives, et en

particulier pour les roches magmatiques et métamorphiques, les photographies permettent de déceler les principaux réseaux de cassures (failles ou diaclases). Par ailleurs, une étude morphologique, complétée par le profil cultural, le couvert végétal, la répartition des sources et des zones humides sur cartes topographiques et photos aériennes, peut permettre dans les régions à substratum de type granitique d'avoir une idée préliminaire sur les variations des épaisseurs de roches altérées au dessus de la roche saine, ces dernières semblant souvent liées à la morphologie.

c) l'étude sur le terrain reste bien entendu essentielle pour les synthèses à cette échelle. Elle s'appuie sur les carrières en activité ou abandonnées, les affleurements divers, qui peuvent être pour la plupart repérés au préalable sur photographies aériennes.

L'examen détaillé de ces points d'observation est la base essentielle des estimations qualitatives et quantitatives des gisements potentiels. On profitera au maximum, à ce stade d'étude des essais géotechniques effectués dans les carrières en activité en évitant la duplication de travaux déjà réalisés par les exploitants. Par contre, échantillonnage et essais devront porter sur les types de roches susceptibles d'intérêt et qui n'ont pas encore donné lieu à exploitation.

GISEMENTS ALLUVIONNAIRES

Lorsqu'il existe dans un bassin alluvionnaire un certain nombre d'exploitations exerçant un suivi de leur production depuis plusieurs années, il peut être très intéressant, avec la collaboration des exploitants, d'extraire de ce suivi les éléments les plus utiles, conduisant à la définition au niveau du bassin étudié de "types de gisement". Nous citerons à titre d'exemple les gisements de la région parisienne, que l'on peut regrouper en 2 catégories principales:

Gisements de remblaiement: de vallée large et non méandrique (fig. 6) en règle générale, dans une section de vallée donnée, au niveau d'une même terrasse: quelle que soit l'extension du gisement (de quelques hectares à quelques centaines d'hectares) l'hétérogénéité sera présente, mais les amplitudes de variation seront pratiquement similaires. Il s'agit donc de gisements hétérogènes dans le détail et homogènes dans l'ensemble.

Les gisements de sables et graviers alluvionnaires répondant à cette définition présentent de faibles variations horizontales de granularité (cf. basse vallée de l'Yonne, Seine en amont de Montereau).

Quelle que soit la conduite d'exploitation, l'évolution de la teneur en sable à l'extraction en fonction du temps se présente sous forme d'une sinusoïde approximative, de faible amplitude et de période courte ou très courte (fig. 7).

Gisements de méandre: ce type d'alluvionnement entraînant une classification assez stricte des éléments (fig. 8, 8 bis), plus le gisement sera étendu au niveau de la même terrasse, plus les hétérogénéités seront marquées. Par contre si le gisement est peu étendu, tout dépendra de sa disposition dans le contexte du méandre. S'il concerne une bande étroite, relativement parallèle à l'axe d'écoulement du cours d'eau, les hétérogénéités seront peu marquées. S'il concerne une surface dont les plus grandes dimensions sont divergentes de l'axe d'écoulement du cours d'eau, les hétérogénéités seront parfaitement marquées. Il s'agit de gisements homogènes dans le détail et hétérogènes dans l'ensemble.

Les gisements de sables et graviers alluvionnaires répondant à cette définition présentent de fortes variations horizontales de granularité, en général lentes et progressives (cf vallée de la basse Seine).

Quelle que soit la conduite d'exploitation (et en envisageant le cas d'un seul point d'extraction), l'évolution de la teneur en sable à l'extraction se présentera sous forme d'une sinusoïde approximative de moyenne à forte amplitude, et de période moyenne à longue (fig. 9).

Toutes ces constatations ont évidemment un caractère général et peuvent être perturbées dans le détail par des conditions locales de dépôt plus complexes (remontée du substratum, rupture de pente du substratum due à un passage de faille, etc...), mais elles permettent d'orienter de façon intéressante les méthodes de prospection au niveau des études plus détaillées (1/25 000, 1/10 000 ou études de gisement proprement dites: 1/1 000).

- De façon générale, tous les gisements en activité feront l'objet, d'une part d'une étude détaillée et, d'autre part de prélèvements en vue d'essais de laboratoire dans la mesure où ces résultats ne sont pas déjà disponibles.

En gisement alluvionnaire noyé, la meilleure solution consiste à prélever le matériau au sortir de l'engin d'extraction, si possible en espaçant ces prélèvements dans le temps. Lorsqu'il existe un front de taille hors d'eau, il faut essayer de prélever les matériaux par saignées verticales sur toute la hauteur du front, ce type de prélèvement correspondant le mieux à ce qui se passe durant l'exploitation du gisement. Dans le même temps, sont notés: l'épaisseur de la découverte, l'épaisseur du matériau exploitable (pour les gisements noyés en activité, par enquête auprès des exploitants), la hauteur du niveau d'eau par rapport au terrain naturel (et si possible ses variations), toutes les hétérogénéités visibles. Ces données permettent une première approche quantitative des réserves (épaisseurs relevées). La réalisation d'essais sur les prélèvements débouche sur un certain nombre de données qualitatives. Dans ce dernier domaine, il convient de bien séparer les données qui n'ont qu'une valeur indicative de celles qui sont intrinsèquement plus "sûres":

. Compte tenu du nombre de prélèvements et des conditions dans lesquelles ils sont faits, il ne faut pas attacher aux granulométries obtenues une trop grande précision, sauf bien entendu si elles correspondent à un suivi d'exploitations (cf. ci-dessus exemples Région Parisienne). Il faut plus s'attacher à donner un fuseau, qui sera souvent large, avec des "tendances", telles que les bosses du sable par exemple. Il en sera de même pour les équivalents de sable, qui n'ont qu'une signification tout à fait relative lorsqu'ils sont effectués sur matériaux bruts et dont les valeurs dépendent beaucoup du mode de prélèvement employé.

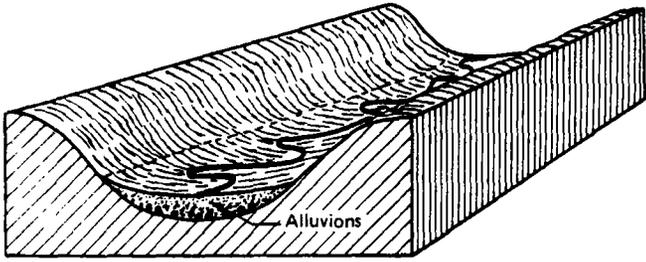


Fig. 6 — Gisement de remblaiement - Vallée large et non méandrique.

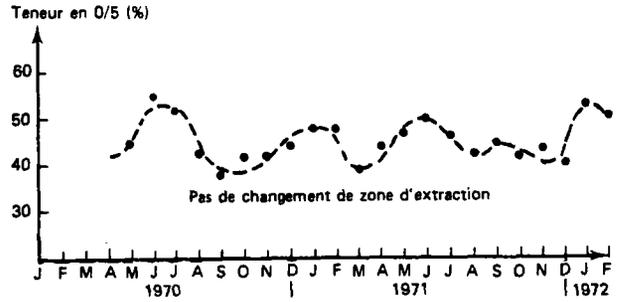


Fig. 7 Evolution mensuelle des teneurs en sable à l'extraction. Gisement de remblaiement — vallée large et non méandrique.

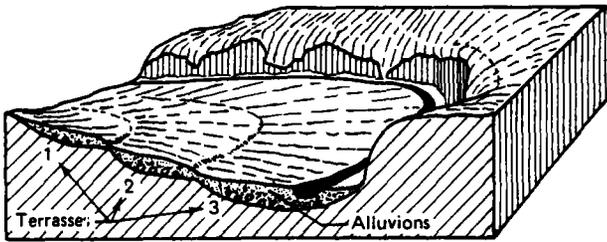


Fig. 8 — Gisement de méandre et terrasses alluviales.

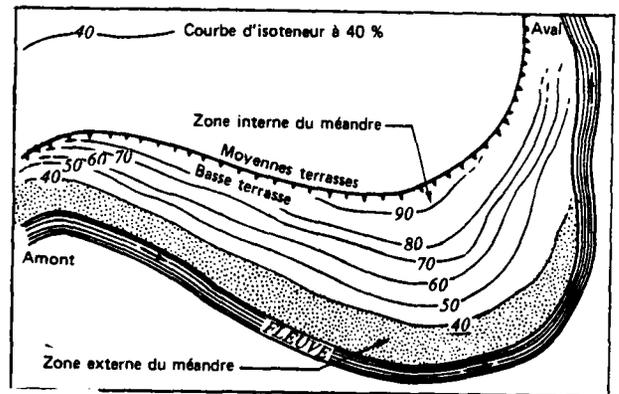


Fig. 8 bis Répartition schématique des teneurs en sable dans un gisement de méandre (basse terrasse).

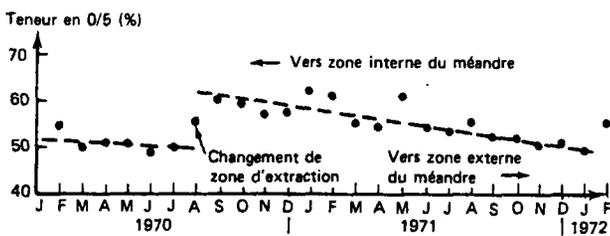


Fig. 9 — Evolution mensuelle des teneurs en sable à l'extraction. Gisement de méandre (Bouailles - basse Seine).

. Par contre, l'identification Pétrographique et minéralogique prend à cette échelle toute son importance. Il est inutile de réaliser plusieurs identifications pétrographiques sur des prélèvements provenant d'un même gisement, la composition pétrographique, à classe granulaire égale n'évoluant que lentement. Il est par contre important de bien repérer les changements dans la géologie du bassin versant et bien entendu tous les apports d'affluents, qui sont des causes de modification de la composition pétrographique.

- Les résultats obtenus pour les essais mécaniques dépendent directement de la composition pétrographique. Partout où cela sera possible, il faut réaliser ces essais sur la production réelle des carrières. Là où n'existe aucun gisement en exploitation, les essais seront faits sur les matériaux bruts. Il ne faudra pas oublier dans ce cas qu'ils n'ont de valeur que pour les granulats roulés pour bétons; en effet, dans tous les gisements où existe une proportion notable d'éléments supérieurs à 20 mm, ces derniers sont très généralement concassés pour être ensuite répartis dans les classes granulaires commerciales (c'est à dire inférieures à 31,5 mm, et souvent même à 20 mm). Ceci signifie qu'il est souvent intéressant de concasser à l'aide d'un concasseur de laboratoire les éléments grossiers, afin de réaliser sur eux les essais de granulats qui permettront de voir leur influence sur l'ensemble du matériau.

Les principaux essais de granulats qu'il est utile de retenir sont: Le Los Angeles ou la fragmentation dynamique (cette dernière après étalonnage sur le Los Angeles), le Microdeval en présence d'eau, l'essai de friabilité des sables. En fonction de la nature pétrographique des constituants, il peut être utile de faire quelques essais de porosité (sur des éléments calcaires par exemple), voire quelques essais d'altérabilité. Dans certains gisements la teneur en matière organique ou en sulfure (type pyrite) doit également être prise en compte. Quand des utilisations bien particulières sont prévues (enduits routiers superficiels par exemple), des essais tels que le coefficient de polissage accéléré peuvent être réalisés sur alluvions concassées.

- Il est bien évident que ces essais mécaniques ne devront être réalisés que lorsque des changements significatifs interviennent dans la composition pétrographique des alluvions.

GISEMENTS DE ROCHES MASSIVES

- L'étude des gisements de roches massives est souvent très délicate à cette échelle, car les massifs étudiés sont assez fréquemment vierges de carrières et il n'est pas possible de prévoir de mesures lourdes, types géophysique ou sondages.

- Pour les calcaires ou de façon générale pour les roches sédimentaires, il s'agit essentiellement d'essayer de déceler les variations latérales et verticales à l'échelle du massif: accroissement ou diminution d'épaisseur des niveaux les plus intéressants, apparition d'intercalations nouvelles exploitables ou non; appréciation de la nature et de l'épaisseur de la découverte. Ceci revient à la réalisation, pour un ou quelques bancs particuliers, d'une carte géologique spécifique, en insistant sur les variations structurales et lithologiques, l'aspect purement stratigraphique n'étant utilisé que comme un outil.

- Pour les roches magmatiques, le problème est encore plus délicat, car elles sont très souvent, sous nos climats, recouvertes d'un manteau d'altération d'épaisseur variable. Nous avons vu ci-dessus comment la morphologie, les photographies aériennes et différents indices peuvent aider à apprécier les variations d'épaisseur de la découverte altérée. Les problèmes qui demeurent sont l'appréciation à partir d'affleurements altérés de l'épaisseur d'altération et des caractéristiques de la roche saine, auxquels il faut ajouter ceux liés à la structure des massifs souvent difficiles à reconstituer à l'aide des seules observations d'affleurements. En attendant que les recherches soient plus avancées dans le domaine des corrélations entre roche altérée de surface et roche saine de profondeur, le raisonnement se fait fréquemment par analogie. C'est d'ailleurs un raisonnement parfaitement valable, dans la mesure où à deux roches présentant à l'affleurement des compositions pétrographiques et des textures voisines, correspondent généralement des faciès sains également voisins, tant pétrographiquement, que mécaniquement.

Sur tous les points de prélèvements possibles (avec bien entendu une sélection quand par hasard ils sont très nombreux), il faut donc réaliser une identification pétrographique au microscope polarisant (y compris sur les faciès altérés, même si la fabrication des lames minces pose quelques problèmes), complétée par d'autres essais sur les faciès les plus sains: masse volumique apparente, porosité, Los Angelès (ou fragmentation dynamique après étalonnage, microdeval en présence d'eau, coefficient de polissage accéléré.

4.2. Niveau moyen:

C'est à cette échelle (1/25 000 à 1/10 000) que se posent actuellement et surtout que se poseront à l'avenir la plupart des problèmes de ressources. Les études qui en découlent s'inscrivent, il faut le rappeler, dans un ensemble d'études et d'enquêtes sur l'état actuel de l'exploitation, les besoins en granulats, les contraintes connues et potentielles, les schémas d'approvisionnement à court et moyen terme, les problèmes hydrauliques et hydrogéologiques, les prévisions de réaménagement.

Les objectifs poursuivis et les méthodes employées étant un peu différentes pour les matériaux alluvionnaires et les roches massives, il est préférable d'aborder les deux problèmes séparément.

4.2.1. Gisements alluvionnaires

a) Objectifs des études:

Au stade de la définition des zones favorables, (stade B) les études portent habituellement sur la zone d'approvisionnement d'un pôle de consommation, telle une agglomération et concernent généralement les vallées principales dans l'aire d'un SDAU ou une aire équivalente. Il s'agit de connaître "avec une précision suffisante" les caractéristiques des gisements alluvionnaires pour permettre d'affecter une valeur comparative à différents secteurs d'une aire assez vaste. On reconnaîtra notamment:

- le stade d'exploitation des granulats déjà atteint dans l'aire considérée,

- l'épaisseur D de la découverte,
- l'épaisseur G des alluvions,
- les zonages correspondants,
- la qualité des alluvions qui détermine leurs utilisations possibles,
- le volume des ressources alluvionnaires global ou par catégorie,
- l'allure de la topographie du substratum après exploitation,
- la présence éventuelle et les niveaux de la nappe phréatique.

Le contenu de l'étude dépend de la signification de l'expression "avec une précision suffisante". Pour des gisements normalement homogènes, il sera possible de délimiter, à l'échelle de 1/25 000 des zones auxquelles on affecte un coefficient d'exploitabilité, la précision des limites étant compatible avec celle du schéma directeur. Si le gisement est très hétérogène, par contre, il sera nécessaire d'accroître la densité des recherches pour délimiter, à l'échelle de 1/10 000 les secteurs exploitables pouvant alors être retenus comme tels au niveau plus détaillé d'un plan d'occupation des sols. Il y a, dans ce cas, telescopage du stade B d'orientation et du stage C de choix des zones exploitables.

Revenant au cas où il est possible, au stade B, d'obtenir des cartes d'orientation, celles-ci, dont nous verrons le principe d'établissement ci-dessous, permettent de réserver des zones à l'exploitation ou au contraire de les affecter à d'autres utilisations. Dans les zones favorables à l'exploitation, la présence d'hétérogénéités locales n'est cependant pas exclue et l'exploitant ne sera donc pas dispensé d'une étude beaucoup plus détaillée, permettant de délimiter à l'intérieur de la zone "favorable" un gisement précis.

Au stade du choix des zones préférentielles à réserver aux carrières dans un plan d'occupation des sols, il s'agit, parmi les zones favorables retenues à cause de leur intérêt relatif et des autres facteurs d'environnement, de délimiter avec une précision compatible avec celle du P.O.S. les secteurs exploitables dans les meilleures conditions. L'échelle à adopter est donc celle du P.O.S. c'est à dire de l'ordre de 1/10 000, ce qui conduira pratiquement à doubler la maille d'investigation retenue pour la détermination des zones favorables, les éléments de connaissance à recenser étant les mêmes que ceux indiqués ci-dessus.

Toutefois, l'adoption de cette échelle (1/10 000) n'est indispensable que lorsque la compétition pour l'occupation des sols est vigoureuse. En effet, si, dans le territoire d'une commune, les secteurs favorables à l'exploitation -étudiés à l'échelle de 1/25 000- représentent une superficie importante sans autre affectation prioritaire, la délimitation des zones de carrières pourra être confondue avec celle des zones favorables, sachant que certaines hétérogénéités peuvent rendre inexploitable une partie du gisement ainsi circonscrit. Cependant, dans ce cas, il faut être conscient du risque d'une implantation désordonnée des carrières préjudiciable souvent à une bonne gestion du sol et du sous-sol.

Ces considérations amènent finalement aux constatations suivantes:

- en règle générale, les études à 1/10 000 (stade C) complètent les études à 1/25 000 (stade B) par un resserrement des mailles de mesure.
- en pratique, la nature des gisements peut amener à conduire les études directement au stade C (1/10 000). Inversement, il est des cas où les besoins de l'aménagement peuvent permettre de s'arrêter au stade B (1/25 000).

Il est indispensable de prévoir pour ce type d'étude une méthodologie et des moyens très souples, pour deux raisons essentielles, dont l'une est technique et l'autre conjoncturelle:

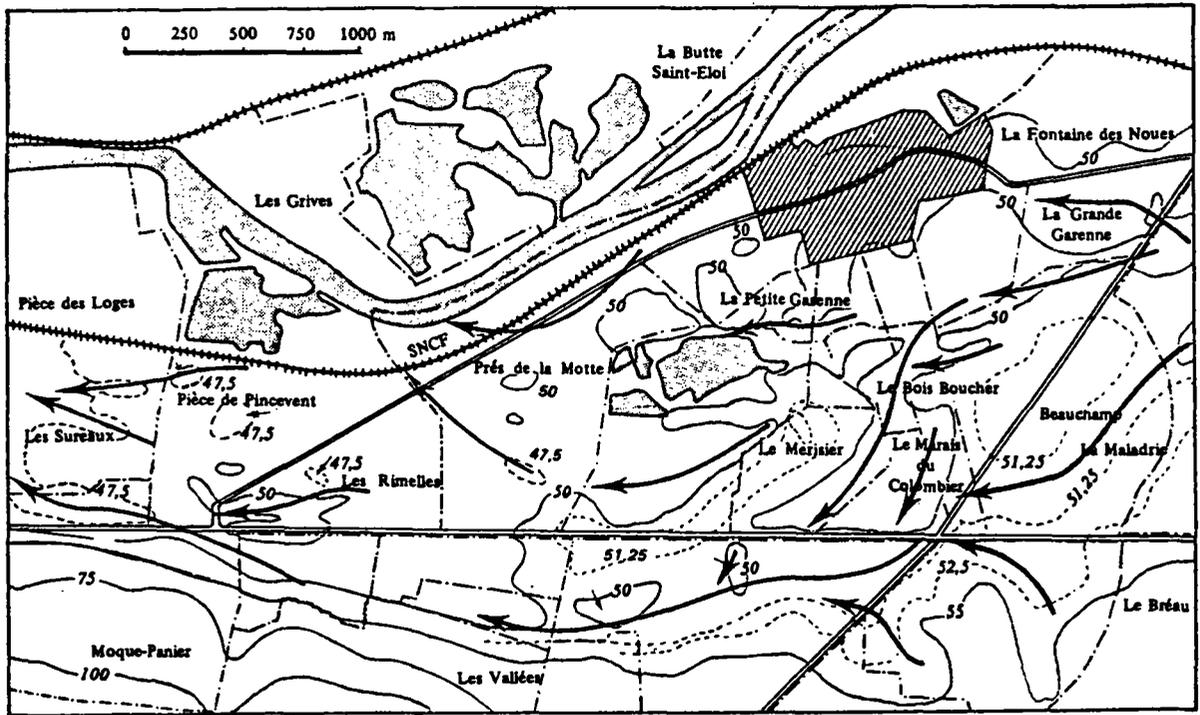
1. les caractéristiques des gisements varient beaucoup d'une vallée à l'autre.
2. les moyens financiers consacrés à l'étude peuvent également varier et influencer sur les méthodes retenues et surtout sur les mailles de mesure. A ce point de vue, il est d'ailleurs essentiel de ne pas descendre au dessous d'une certaine densité de mesures sous peine de risques importants d'erreurs, qui nuisent à la crédibilité de l'étude.

La souplesse se traduira à la fois dans l'enchaînement des phases et dans le choix des méthodes. Les exemples que nous allons exposer concernent 4 ou 5 études importantes réalisées au cours des dernières années.

b) Première phase d'intervention

Elle comprend:

- l'examen des cartes géologiques existantes (à l'échelle du 1/80 000 ou 1/50 000 selon les régions),



Réduction d'étude simplifiée par rapport au document de base à l'échelle de 1/25 000.

Fig. 10 : Traces d'anciens axes d'écoulement du cours d'eau (phase n°1).

- la recherche et l'analyse de la documentation géologique locale (publications, code minier, archives des laboratoires, etc...),
- l'examen des couvertures de photographies aériennes existantes, afin de repérer tout indice favorable: localisation de gravières, zones remblayées, anciens lits mineurs (fig. 10), terrasses en bordure de vallée, etc...,
- une visite sur le terrain de tous les indices repérés, notamment les gravières, avec notes sur:
 - . l'épaisseur de la découverte,
 - . éventuellement l'épaisseur du matériau exploitable,
 - . la profondeur du niveau d'eau par rapport au terrain naturel,
 - . les pollutions des ballastières après extraction.

Dès ce stade, des prélèvements d'échantillons sont effectués dans certaines exploitations pour analyse en laboratoire (ce qui permet parfois d'utiliser les installations en activité pour le prélèvement des graves noyées).

Cette première phase permet de dégager un certain nombre d'éléments indispensables pour la poursuite de l'étude:

- mise en évidence de l'aspect évolutif du matériau, en relation avec la géologie des sites traversés,
- aperçu de la nature pétrographique et de la granularité du matériau,
- conditions de gisement du matériau, telles que:
 - . ordre de grandeur de l'épaisseur de la découverte et ses éventuelles variations d'épaisseur et de nature,
 - . appréciation sur les matériaux graveleux ou sablo-graveleux sous-jacents,
 - . avis sur la nature du substratum.
- renseignements sur la position et les fluctuations de la nappe phréatique et sur les relations entre cette nappe et les gisements,
- choix des méthodes de prospection à utiliser pour la phase suivante, compte tenu des données ci-dessus.

On constate que tout ce travail préliminaire correspond approximativement à ce qui est réalisé pour les études de niveau général évoquées précédemment. Il est donc bien évident que cette première phase d'intervention pourra être allégée ou supprimée lorsque de telles études ont déjà été faites dans la région concernée.

c) Seconde phase d'intervention.

Le programme de cette seconde phase est fonction des résultats obtenus au cours de l'étude globale de la phase précédente. Si les résultats obtenus sont très insuffisants ou trop irrégulièrement répartis, il n'est pas exclu d'intercaler une étude préliminaire à cette seconde phase et dont l'objet sera de compléter, de façon suffisante, la documentation.

Ce niveau d'étude atteint, on peut être amené à éliminer certains secteurs de la zone à prospecter, qui se révèlent dès ce stade franchement défavorables.

Les techniques utilisées en 2° phase sont très généralement les suivantes:

α) Utilisation de la géophysique électrique

et plus particulièrement de la méthode des trainés† avec 2 longueurs de ligne, l'une courte permettant de tester la découverte, l'autre plus longue permettant d'apprécier l'ensemble découverte + matériaux sous-jacents.

Compte tenu de l'intérêt de la méthode et de sa rapidité, on utilisera généralement pour des études à 1/25 000 des mailles de 100 m x 200 m, voire même dans les zones que l'on sait hétérogènes de 100 m x 50 m. La maille des mesures pourra être 2 fois plus dense s'il s'agit d'études à 1/10 000. Rappelons aussi que les nouvelles méthodes mises au point, comme la méthode magnéto-tellurique artificielle (M.T.A.) permettent, grâce à leur facilité de mise en oeuvre, de serrer la maille de mesure pour un coût identique.

Dans certains cas, lorsque l'étude préliminaire à montré que les épaisseurs de découverte étaient faibles, ou bien lorsque le contraste entre la découverte et le matériau était mal tranché, il s'est avéré plus efficace de remplacer la longueur de ligne courte par des sondages rapides à la tarière à main, qui permettent d'obtenir à la fois la nature et l'épaisseur de la découverte, et souvent le niveau de la nappe aquifère (découverte faible, presque toujours inférieure à 2 m).

† Trainé de résistivité (zones alluvionnaires)

Profondeurs d'investigation faibles (faible longueur de ligne AB)

- valeurs de résistivité fortes: faible découverte en général.
- valeurs de résistivité faibles: forte découverte en général.

Profondeur d'investigation forte: (grande longueur de ligne AB)

- valeurs de résistivité fortes: peu de découverte en général et matériau sain.

- valeur de résistivité faibles: soit forte découverte, soit faible découverte et argile intercalaire ou matériau pollué par l'argile.

β) Sondages

Ces derniers posent deux problèmes:

d'une part la méthode à employer, d'autre part la densité des sondages. Il est évident que ces deux paramètres vont varier beaucoup en fonction de:

- l'hétérogénéité géométrique du gisement, définie par l'étude géophysique,
- la granularité du matériau (on ne peut pas utiliser les mêmes sondeuses avec des graves 0-50 mm qu'avec des graves 0-300 mm)
- l'épaisseur à prospecter,
- la cote de la nappe.

Par ailleurs, il est exclu à cette échelle de procéder systématiquement à des sondages lourds, très coûteux (cf. chapitre ci-dessus).

Les principales méthodes utilisables à ce stade sont les suivantes:

- tarière continue
 - sondages destructifs au marteau perforateur, complétés par des diagraphies (essentiellement radio-activité naturelle) dans le train de tige,
 - sondages en vibro-fonçage,
 - sondages à la tarière simple,
 - sondages à la tarière simple équipée d'un piège à graves,
 - carottier battu.
- . certaines de ces méthodes sont plus rapides que les autres, d'autres permettent dans certains sites de recueillir rapidement des prélèvements corrects, d'autres (bien que ne donnant que des mesures indirectes, comme la diagraphie) définissent avec précision la géométrie du gisement. Il est très difficile de décider a priori sans bien connaître le site et les résultats de la campagne géophysique, la méthode la mieux adaptée. Il s'agit, pour toutes, de méthodes relativement légères, dont le prix de revient au mètre est au moins 3 à 4 fois moins élevé que celui des méthodes lourdes (sondages carottés - à la soupape - Bénoto). Il devrait être possible d'éviter, dans tous les cas, l'usage de ces dernières pour les études que nous envisageons dans ce chapitre. Bien veiller cependant lorsqu'on veut des prélèvements représentatifs au rapport entre le diamètre du sondage et la dimension maximale des graves.

- en ce qui concerne la maille des sondages, 2 problèmes se posent: le choix des zones où ils seront implantés et la densité dans ces zones. Le choix des zones sera fait en fonction des résultats de la géophysique: Dans les zones réputées défavorables (et qui dépendent bien entendu des régions), en fonction de l'épaisseur de découverte prévue par la géophysique ou/et du rapport Découverte/Matériau exploitable, on ne réalisera que des sondages de vérification: dans certains cas, 1 ou 2 sondages par km² suffiront pour ces zones. Dans les zones réputées favorables, on peut estimer qu'il est nécessaire de réaliser environ 1 sondage pour 5 hectares, dans le cas d'études à 1/25 000 et 1 sondage pour 2 ou 3 hectares pour des études à 1/10 000 sachant que ces chiffres ne sont que indicatifs. Par ailleurs si on a des zones favorables isolées, de petite superficie (1 ou 2 ha par exemple) il sera nécessaire, sur chacune d'elles d'effectuer au minimum 1 sondage. Par contre si on a une zone géophysiquement très homogène de 10 hectares, un sondage pourra suffire à l'échelle de 1/25 000 et 2 sondages à l'échelle de 1/10 000. En règle générale, les sondages ne seront pas disposés selon une maille régulière, mais plutôt selon des profils perpendiculaires à la vallée, les sondages étant plus rapprochés transversalement que longitudinalement (mailles 100 x 300 m à 200 x 500 m à 1/25 000 et 50 x 200 m à 100 x 300 m à 1/10 000 ou même 100 x 500 m et 50 x 250 m si les structures alluvionnaires sont très allongées.
- Enfin, le nombre de sondages avec prélèvements pourra généralement (sauf gisement très hétérogène) être réduit. Cependant, si l'on utilise une méthode de sondage qui récupère de toutes façons du matériau, on aura toujours intérêt à conserver ce dernier, même si dans un premier temps, on ne prévoit qu'un nombre limité d'essais.
- La second phase d'intervention permet:
 - . de connaître l'épaisseur moyenne des matériaux alluvionnaires par section prospectée ainsi que l'épaisseur moyenne de la découverte,
 - . d'établir, grâce aux sondages, des corrélations entre les valeurs de résistivité et l'épaisseur de la découverte et de confirmer le zonage établi à partir de la prospection géophysique,
 - . de connaître la proportion du gisement à sec et en eau,
 - . d'apprécier la qualité des matériaux exploitables, grâce aux essais réalisés sur les sondages. Il s'agit essentiellement de:
 - ° granulométries (à réaliser le plus systématiquement possible),
 - ° équivalents de sable (à réaliser sur les mêmes prélèvements que les granulométries, en tenant compte pour leur interprétation du mode de prélèvement et de ce que sera la future exploitation),

- ° analyses pétrographiques des différentes classes granulaires: Peuvent être limitées à 3 ou 4 pour l'ensemble de la zone étudiée, sauf si la nature géologique des bassins versants change fréquemment ou si l'alluvionnement est modifié par l'apport d'affluents (dans ce cas un essai à chaque changement prévisible de composition).
- ° mesures des coefficients Los Angeles et Microdeval sur les mêmes prélèvements que les analyses pétrographiques (si la zone renferme des carrières exploitées, réaliser les essais sur les matériaux réellement produits:)
- ° essais divers: idem (selon les usages particuliers envisagés pour le matériau).

Au stade du choix des zones préférentielles d'exploitation, (études à 1/10 000) les essais géotechniques complémentaires à effectuer, lorsque le programme ci-dessus a été réalisé pendant l'étude d'orientation (à 1/25 000), concernent principalement:

- les analyses granulométriques,

- un nombre limité d'équivalent de sable.

Les autres essais: analyse pétrographique, essais mécaniques, essais divers ne sont normalement pas repris.

d) Classement des gisements alluvionnaires

Il est tentant pour des techniciens de s'en tenir à une expression cartographique des données brutes (épaisseurs, qualités, etc...). Mais pour que les cartes soient utilisables par tout le monde, il est indispensable que la cartographie exprime un classement des gisements, ce qui suppose le choix difficile de critères de classement. Ceux-ci peuvent être variés d'une vallée à une autre. Nous donnerons à titre d'exemple ceux qui ont été retenus pour certaines études réalisées sur les vallées de la Marne et de la Petite Seine.

Critères

G/D: rapport du volume G du matériau exploitable sur le volume D de la découverte. Plus ce rapport est grand, plus le gisement est intéressant, à découverte égale. Il n'a été retenu dans le contexte technico-économique actuel comme "zone exploitable" que celles où G/D atteignait ou dépassait 2. (dans des régions particulièrement pauvres en matériaux, il peut être envisagé de descendre à 1, si G est supérieur à 3 m). (1)

(1) Selon l'aménagement susceptible d'être demandé à l'issue de l'exploitation (mise hors d'eau du terrain par exemple) le rapport G/D peut varier dans des proportions importantes. La qualité de la découverte a également une importance pour le réaménagement.

D: épaisseur de la découverte. Plus D est grand, plus l'extraction nécessitera des moyens importants et plus l'épaisseur du matériau devra être importante pour les justifier. Dans la région considérée, la limite entre découverte "forte" et "faible" a été fixée à 2 m.

Qualité du matériau. Il s'agit essentiellement de la granularité. Ont été distinguées les zones sableuses et les zones graveleuses, en partant de la considération que, compte tenu du contexte géologique local, les secondes sont beaucoup moins répandues que les premières et sont donc plus "favorables".

D'autres critères indépendants de la valeur technique du gisement, tels ceux évoqués au paragraphe 2-7 (environnement-économie) peuvent éventuellement se superposer aux critères techniques mentionnés ici.

Présentation cartographique

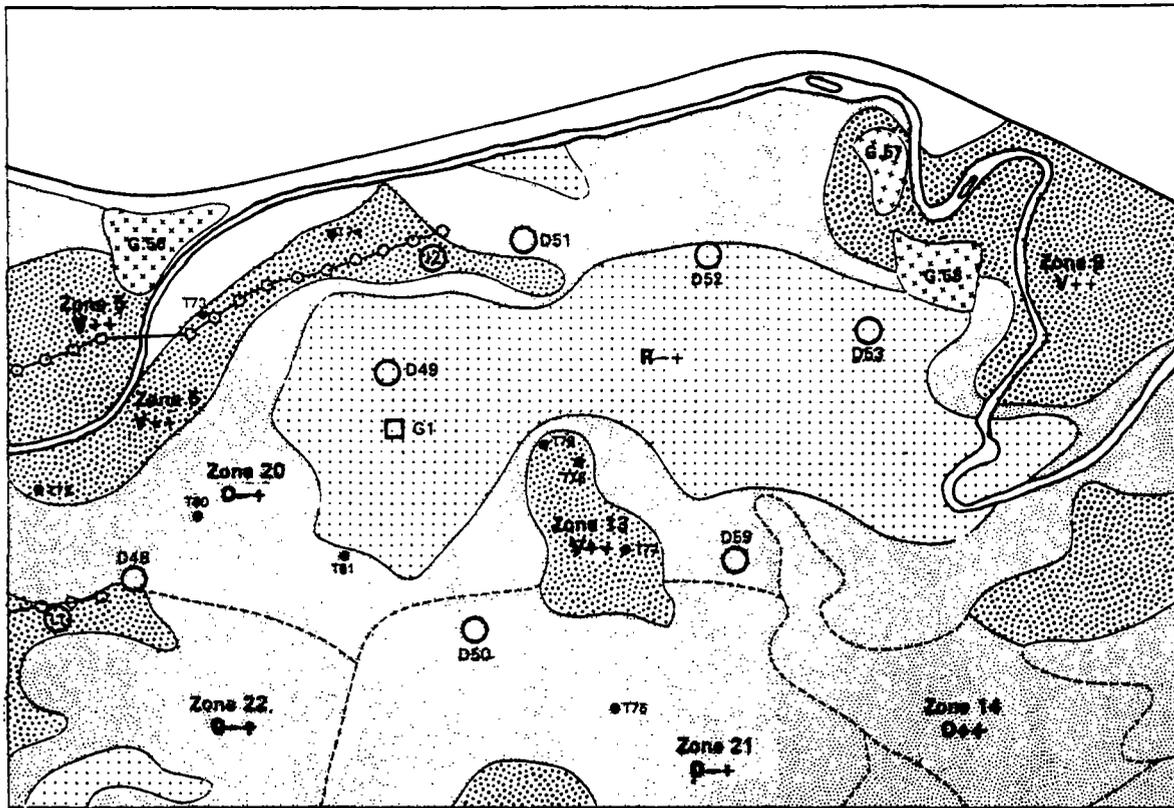
La figure donne un exemple de carte d'orientation des possibilités d'extraction. (fig. 11)

Les différentes zones sont affectées à la fois d'une couleur (ou d'une trame) et d'un indice (ici une lettre) qui sont définis par la prise en compte simultanée (tableau à 2 entrées) du rapport $\frac{G}{D}$ et de l'épaisseur de la découverte. Dans l'exemple donné, ce tableau conduit aux résultats suivants:

	$\frac{G}{D} > 3$	$2 < \frac{G}{D} < 3$	$\frac{G}{D} < 2$
$D > 2$	V -	O -	R -
$D < 2$	V +	O +	R +

V signifie zone très favorable, O zone moyenne et R zone défavorable.

Chaque zone est en outre affectée d'un second signe + ou - selon qu'il s'agit d'un matériau graveleux (+) ou sableux (-).



- Sondage tarière à main
- Sondage diagraphie
- Piège à grave
- o-o-o Profil de sondages électriques
- Limite de zone (calcul cubature de matériau)
- v++ Zone très favorable
- o-+ Zone moyenne
- R-+ Zone défavorable
- ZONE 1 Numéro de zone (calcul cubature matériau)
- G 56 Gravière visitée

	R > 3	2 < R < 3	R < 2
D > 2	V-	O-	R-
D < 2	V+	O+	R+

2° signe + = grave
 - = sable
 Valeurs indicatives de la zone

Fig. 11 : Exemple de carte d'orientation des potentialités d'extraction

Un tel document est donc synthétique, clair et directement utilisable par l'aménageur. Il est cependant indispensable de disposer sous forme d'annexes de tous les documents de base. Celui qui a réalisé la synthèse est en effet amené à prendre des options qui seront peut être différentes dans un autre contexte ou avec des normes d'utilisation autres. Il est nécessaire dans ce cas de pouvoir retourner aux sources des données pour réaliser une autre interprétation d'après les critères nouvellement choisis.

4.2.2. Gisements de roches massives

Les études de gisements à 1/25 000, sont à la fois plus simples et plus difficiles que pour les gisements alluvionnaires. Plus simples dans la mesure où un seul site reconnu valable peut représenter à lui seul des dizaines de millions de mètres cubes, du moins dans les roches de type magmatique ou métamorphique. Plus difficiles parce que la délimitation de sites valables pose souvent des problèmes qui obligent à recourir aux sondages profonds, donc coûteux. De façon générale, la connaissance (plus ou moins précise selon les cas) d'un certain nombre de paramètres est nécessaire. Nous examinerons successivement les principaux paramètres et les méthodes qui permettent de les appréhender.

a) La découverte

° Gisements calcaires:

Un niveau calcaire à faciès homogène présente rarement une puissance considérable. On peut dire par expérience que lorsque la hauteur du front exploitable est de 15 à 20 mètres, ce qui est le maximum pour beaucoup de gisements français, la connaissance de l'épaisseur de la découverte et de sa nature est le facteur primordial de son exploitabilité. Cette découverte peut être un niveau totalement différent (argile, marne, par exemple) et dans ce cas, une bonne étude stratigraphique du secteur doit permettre de connaître son épaisseur et sa nature, avec un nombre très limité de sondages ou d'opérations géophysiques. Mais elle est beaucoup plus fréquemment constituée d'une épaisseur variable de matériaux plus ou moins altérés ou parfois seulement décomprimés (débit en plaquettes). Dans le premier cas, elle ne sera sans doute pas exploitable, dans le second l'utilisation des plaquettes peut être envisagée.

° Gisements de roches magmatiques ou métamorphiques:

La définition de la découverte est généralement plus complexe que pour les calcaires car le degré d'altération varie progressivement depuis l'argile d'altération en place jusqu'à la roche saine, en passant (et parfois avec des recurrences) par des stades divers d'altération. Par ailleurs, l'altération peut n'être visible qu'au niveau des minéraux constitutifs (feldspaths - ferro-magnésiens) et n'être observable qu'au microscope ou d'après les résultats d'essais mécaniques. On verra à la p. 45 les moyens utilisés en ce qui concerne les roches cristallines.

b) Le matériau exploitable

Il s'agit de définir approximativement le volume total exploitable, les variations d'épaisseur du matériau exploitable, le nombre, le volume et la nature des hétérogénéités (données géométriques du site), ainsi que la nature pétrographique, les caractéristiques mécaniques, l'état de fragmentation des matériaux en place, la distribution des pollutions éventuelles (données qualitatives).

Cela revient à préciser:

- pour les gites calcaires et de façon générale pour les roches stratifiées (quartzites par exemple), le pendage et la structure du gisement, car les niveaux sédimentaires peuvent changer rapidement de faciès et sont souvent peu épais. Le repérage des cassures est très important, des décalages faibles à l'échelle géologique (10-15 m par exemple) pouvant supprimer totalement un gisement. Pour les calcaires, il peut être utile de compléter une analyse minéralogique par une analyse chimique (teneur en silice, en dolomie, en CO_2/Ca). La "pollution" dans les gites calcaires peut être soit liée aux conditions de dépôt (intercalation de petits lits argileux ou marneux), soit "accidentelle" (fissures verticales ou poches de dissolution remplies d'argile).
- pour les gites magmatiques: la recherche de la structure est souvent plus délicate, les hétérogénéités étant en général distribuées de façon plus imprévisible: filons de roches de nature différente de la roche principale, failles, diaclases, zones broyées, etc... Ces "accidents" sont d'ailleurs la cause principale de la pollution des gisements, les filons étant souvent plus altérés que la roche principale et les failles s'accompagnent habituellement d'une épaisseur très variable (quelques mètres à quelques dizaines de m.) de roches broyées et très altérées inutilisables comme granulats.

c) Comment étudier les sites de roches massives

° Etude géologique: A cette échelle, c'est la phase la plus importante et qui demande une bonne connaissance géologique de la région. Lorsqu'il n'existe pas d'étude générale préalable, les méthodes à employer sont les mêmes que pour les études à 1/100 000 (cf. ci-dessus). Des recherches en cours devraient permettre, pour les roches magmatiques, de prévoir avec suffisamment de précision la nature de la roche saine en profondeur à partir de l'examen pétrographique et minéralogique détaillé des faciès altérés de surface.

Comme les massifs sont souvent étendus, c'est seulement sur des zones limitées définies grâce à cette étude géologique préliminaire (incluant des prélèvements et des essais en laboratoire) que l'on pourra mettre en oeuvre les phases suivantes:

° Géophysique de surface: Compte tenu des coûts réduits, il faudra utiliser en priorité les trainés de résistivité, (maille de l'ordre de 100 x 50 ou 50 x 50), en particulier la méthode magnéto-tellurique artificielle (M.T.A.) ou la méthode des sondages électriques. Ceci pourra être complété éventuellement par quelques dispositifs sismiques (2 par hectare, par exemple). L'interprétation des deux séries de mesures donne une bonne idée des variations d'épaisseur de la découverte et, dans les zones où celle-ci est faible, des indications sur la roche saine.

A ce stade, les opérations varieront en fonction de ce que l'on cherche: s'il s'agit de trouver des gisements susceptibles de fournir des granulats à béton, on pourra arrêter l'étude à ce niveau, les exigences en ce qui concerne le matériau étant moindres que pour les granulats routiers (sauf si l'on se trouve dans des sites où le lavage est impossible; dans ce cas, la connaissance de la propreté du matériau dans son ensemble est indispensable).

° Sondages carottés: On pourra se limiter, en raison de leur coût, à 1 sondage par site, qu'il faudra implanter en fonction des résultats de la géophysique dans une zone à faible découverte; il ne sera d'ailleurs pas forcément nécessaire de prolonger ce sondage jusqu'à une profondeur importante, s'il apparaît que le matériau est homogène ou présente des hétérogénéités répétitives (20 m par exemple, ce qui est fréquemment le cas dans les gisements magmatiques). Il faudra par contre souvent traverser toute la série exploitable dans les roches stratifiées (calcaires variés, alternances schistes-quartzites) sauf évidemment si l'on dispose à proximité de bonnes coupes que l'on peut échantillonner (dans ce cas on peut se dispenser des sondages carottés).

Le sondage carotté servira à une identification précise de roches rencontrées, à des essais de laboratoire (pétrographie, Los Angeles, Microdeval, etc...) et aux choix des sondes de diagraphie les mieux adaptées au site (2 en général).

° Sondages destructifs complétés par la diagraphie:

Ils permettent, après étalonnage dans le sondage carotté, de prévoir la structure du gisement (cf. ci-dessus I.5.). La maille dépendra beaucoup de mesures précédentes: (géophysique, sondage carotté, et surtout de la complexité géologique du site). On peut estimer que la densité des sondages destructifs pourra varier de 1 pour 5 hectares dans les sites particulièrement homogènes, à 1 par hectare pour les sites les plus complexes (roches sédimentaires faillées, ou massif de roches magmatiques recoupé de filons et à bords mal définis par exemple). Remarque essentielle: l'implantation des sondages destructifs peut être modifiée en cours de campagne au fur et à mesure des résultats obtenus dans les sondages précédents.

Les études de gisement à 1/10 000 entreprises à la suite des études à 1/25 000 dont il est question ci-dessus visent à lever les incertitudes qui pourraient subsister et concerneront donc en général des secteurs particuliers.

Les indéterminations à lever pourront porter sur:

- la topographie du toit du matériau exploitable dans certains secteurs.
- la présence de certaines discontinuités: failles, poches de dissolution dans les calcaires ou d'altération dans les roches magmatiques.

Les travaux complémentaires à réaliser pour cette phase d'étude pourront comporter des trainées de résistivité à une maille plus serrée ou avec plus grandes longueurs de ligne, voire des sondages électriques et des sondages destructifs avec diagraphie. Il est pratiquement impossible a priori de déterminer le volume de ces travaux complémentaires qui dépend:

- de la maille effective des mesures lors de l'étude à 1/25 000,
- de la complexité du gisement et de l'altération qui l'affecte
- des résultats de la phase d'étude à 1/25 000.

- En conclusion de ce chapitre sur les études à échelle moyenne, 2 constatations très importantes:

- . de très bonnes études documentaires et géologiques sont la première condition du succès.
- . si l'on peut prévoir les méthodes à utiliser en fonction du contexte, il est difficile de prévoir les mailles de mesure au moment de l'établissement du devis. On peut prévoir par exemple une maille pour les trainés de résistivité, qui ont un caractère assez systématique et qui sont destinés à couvrir de grandes surfaces (encore que l'étude géologique peut amener à supprimer des zones prévues au départ ou au contraire à densifier les mesures dans d'autres), mais il est très difficile de prévoir avant les résultats des études géophysiques, le nombre de sondages nécessaires et a fortiori leur implantation.
- . cette situation est inhérente à pratiquement toutes les opérations de prospection dans lesquelles le volume des travaux à effectuer dans une aire déterminée dépend:
 - ° d'une part des connaissances déjà acquises au démarrage de l'opération,
 - ° d'autre part de la complexité et en définitive de la taille réelle du gisement à étudier qui ne sont découvertes qu'au fur et à mesure du déroulement des diverses phases de l'étude.

Le volume des travaux à effectuer étant difficile à fixer a priori, dans ces études, il faudrait pouvoir instituer une certaine souplesse financière lors de l'établissement des devis d'opération. Les opérateurs devraient pouvoir discuter avec les services compétents (en particulier le service chargé du contrôle) du programme à mettre en oeuvre après chaque phase d'étude, notamment lorsqu'ils ont en main les résultats des mesures géophysiques, afin de décider de la suite raisonnable à donner. S'enfermer dans un cadre trop rigide au niveau du devis peut conduire à faire un nombre de sondages ou trop élevé ou insuffisant.

Il serait donc souhaitable, dans les études de ressources en granulats aux échelles moyennes, de prévoir, dans les devis prévisionnels, un financement pour un programme comportant un nombre minimal de sondages et assorti d'une provision pour une extension éventuelle de ce programme. Celle-ci serait décidé par le service chargé du contrôle, seulement après concertation avec l'opérateur sur le vu des résultats de la prospection géophysique.

4.3. ETUDE DETAILLEE D'UN GISEMENT:

L'exploitant qui étudie un gisement de façon détaillée se fixe un certain nombre d'objectifs; il s'agit pour lui définir:

- les cubatures précises des matériaux exploitables et des morts terrains contenus dans le gisement.
- le ou les différents partis de réaménagement possibles (devant être tous compatibles, pratiquement et économiquement, avec la géologie du site à exploiter).
- le phasage de principe de l'exploitation et des mouvements de terre associés, ces derniers étant conçus de manière à s'intégrer dans le parti de réaménagement retenu, ce dernier progressant au fur et à mesure de l'avancement de l'exploitation, ce qui implique souvent la simultanéité des opérations de découverte et des opérations de découverte et de réaménagement (en particulier pour les gisements alluvionnaires ou les gisements de roches massives, dont le front de taille est peu élevé).
- le mode de traitement de la découverte (matériel, etc...),
- le mode d'extraction des matériaux (et éventuellement de transport à l'installation de traitement).
- le type de traitement à faire subir aux granulats et la gamme de production possible,
- le matériel de traitement (choix, dimensionnement: criblage, lavage, concassage, traitement des sables, effluents),
- le bilan économique prévisionnel de l'exploitation du gisement.

A quelques nuances près, ces objectifs valent aussi bien pour les gisements de roches massives que pour les gisements alluvionnaires. Pour y parvenir, les méthodes par contre diffèrent:

4.3.1. Gisements alluvionnaires

La première partie de l'étude est consacrée à la détermination très précise des paramètres géométriques du gisement (épaisseurs de découverte, matériaux, etc...).

La seconde partie de l'étude est consacrée à la détermination très précise des paramètres qualitatifs du gisement (granularité, pollution, etc...). Cette seconde partie est plus ou moins développée, suivant les caractéristiques géologiques du gisement: les gisements de "méandre" nécessitent en effet des investigations détaillées en raison de leur hétérogénéité d'ensemble, ce n'est pas le cas dans les gisements de "remblaiement".



Fig. 12.1 - Emplacement des sondages.

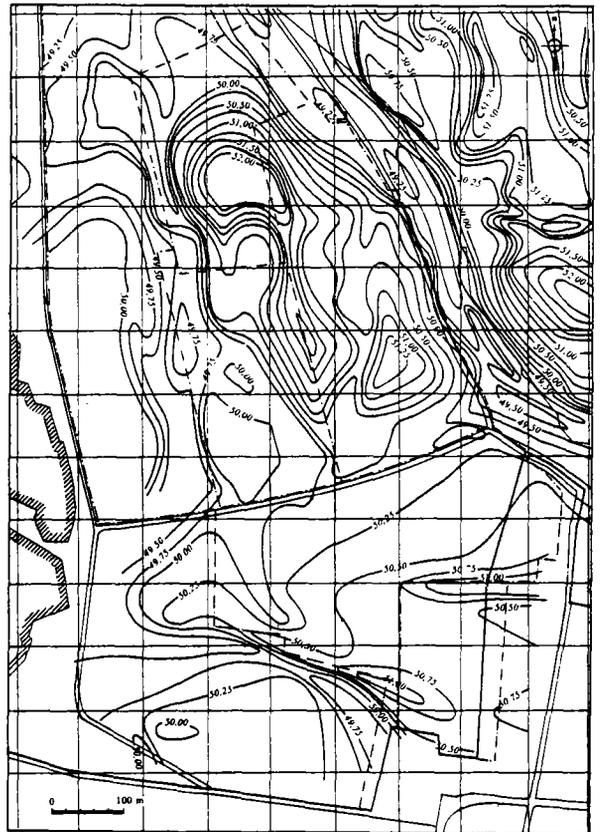


Fig. 12.2 - Courbes de niveau du sol.

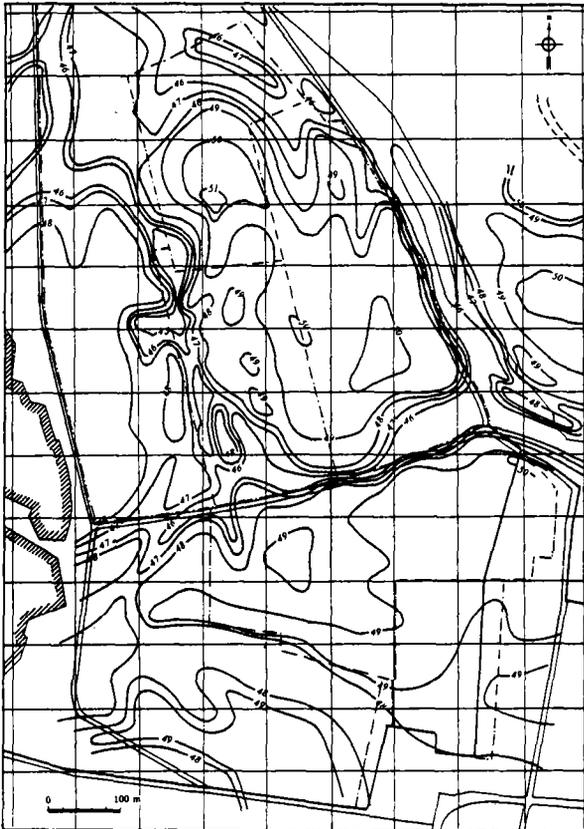


Fig. 12.3 - Courbes de niveau du toit du sable et des graviers.

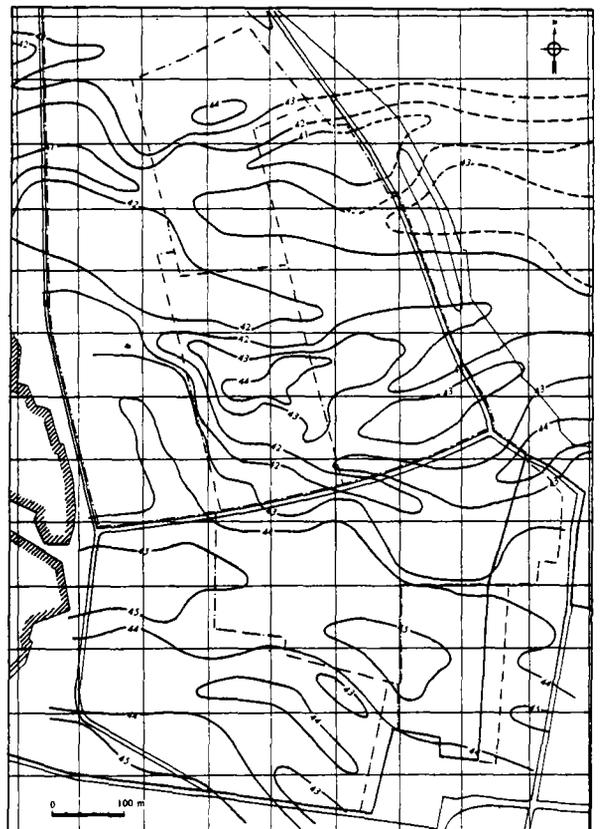


Fig. 12.4 - Courbes de niveau du substratum des sables et graviers.

Réductions d'études simplifiées par rapport au document de base à l'échelle de 1/2 000.



Fig. 12.5 — Courbes des épaisseurs de découverte.

Réductions d'études simplifiées par rapport au document de base à l'échelle de 1/2 000.

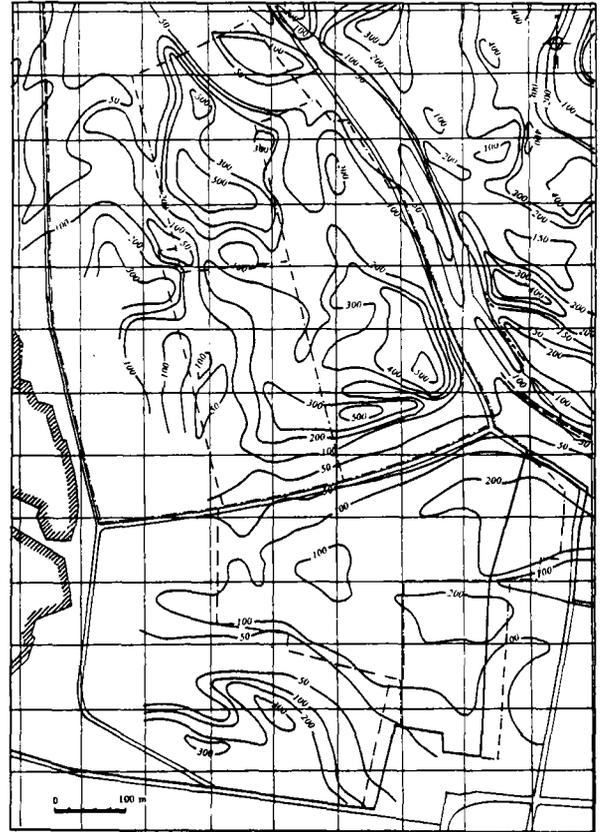


Fig. 12.6 — Courbes d'égalité de résistivité.

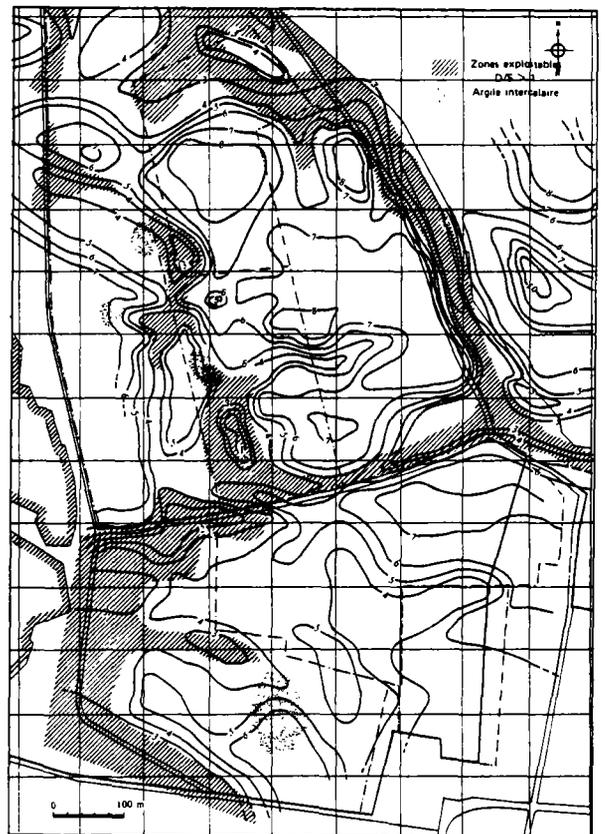


Fig. 12.7 - Courbes des épaisseurs des sables et graviers

a) Stade n° 1: détermination des paramètres géométriques détaillés du gisement

On fait appel aux moyens suivants:

Topographie: nivellement précis (au centimètre) de l'ensemble de la zone étudiée. Nivellement de tous les travaux de sondage.

Géophysique: trainés de résistivité à maille serrée (25 x 25 m ou 20 x 20 m) et à faible profondeur d'investigation pour étude de détail de la découverte (interpolation facilitée entre les sondages).

Sondages: sondages mécaniques à maille serrée (50 x 100 m ou 100 x 100 m) à la tarière continue pour la détermination ponctuelle des épaisseurs de découverte, de sables et graviers et des limites "toit" et "mur" du gisement (+ couches éventuelles d'argile intercalaire).

Ces travaux servent de base à l'établissement d'un dossier type de synthèse à l'échelle du 1/1 000 ou 1/2 000 ou du 1/2 500 contenant les cartes suivantes:

- implantation des sondages (fig.12-1),
- topographie détaillée TN (fig. 12-2),
- topographie détaillée du toit de gisement (fig. 12-3),
- topographie détaillée du mur du gisement (substratum) (fig. 12-4),
- isopaques de la découverte (fig. 12-5),
- cartes de trainés de résistivité (fig. 12-6),
- isobathes de la nappe phréatique éventuellement.
- carte des épaisseurs de sables et graviers (fig.12-7).

Le planimétrage des cartes isopaques permet d'établir les cubatures détaillées du gisement "Dossier annexe des cubatures" (matériaux exploitables découverte: stock de mort-terrains utilisable pour les travaux de ré-aménagement).

Les cartes topographiques des différents niveaux permettent de définir les conditions de traitement de la découverte, ainsi que les différents modes d'extraction possibles (nécessité de connaître les variations du niveau phréatique éventuellement) et les différents partis d'aménagement possibles (topographie du substratum, squelette du réaménagement).

b) Stade n° 2: détermination des paramètres qualitatifs détaillés du gisement.

On fait appel aux moyens suivants:

Géophysique: trainés de résistivité à maille serrée (25 x 25 m ou 20 x 20 m) à forte profondeur d'investigation pour étude de la pollution en masse ou par de l'argile intercalaire.

Sondages lourds: effectués en nombre plus ou moins important suivant le type du gisement, ils sont implantés suivant des profils perpendiculaires aux principaux axes d'écoulement du gisement (maillage très variable suivant le cas: de un sondage par hectare à un sondage pour 10 ha).

Dans certains types de gisement bien connus de longue date (par exemple: gisements de remblaiement homogènes type basse vallée de l'Yonne), des sondages de ce type sont en fait inutiles.

Dans les gisements ennoyés, on utilise en général des sondages du type soupape, Benoto, VPRH, ou tarière équipée d'un piège à "graves".

Dans les gisements hors d'eau, on utilise en général des sondages à la pelle hydraulique équipée en benne puisatier ou éventuellement des sondages à la tarière de gros diamètre ($\emptyset > 400$ mm).

Ces travaux servent de base à l'établissement d'un dossier type de synthèse établi sur fonds de plans cadastraux à l'échelle du 1/1 000, du 1/2 000 ou du 1/2 500 contenant:

- une carte isopaque de l'argile intercalaire (fig. 13-1),
- une carte de trainés de résistivité à grande profondeur (fig. 13-2),
- une carte d'isoteneurs en fraction sable 0/5 mm (fig. 13-3),
- un rapport d'étude (laboratoire) avec:
 - ° étude détaillée de la granularité du gisement (interprétation statistique des résultats bruts,
 - ° étude détaillée de la pollution,
 - ° étude détaillée éventuelle (zone mal connue) des caractéristiques pétrographiques et mécaniques. (Deval, Microdeval, Los Angeles, etc...) des granulats.



Fig. 13.1 — Courbes d'égale épaisseur de l'argile intercalaire.

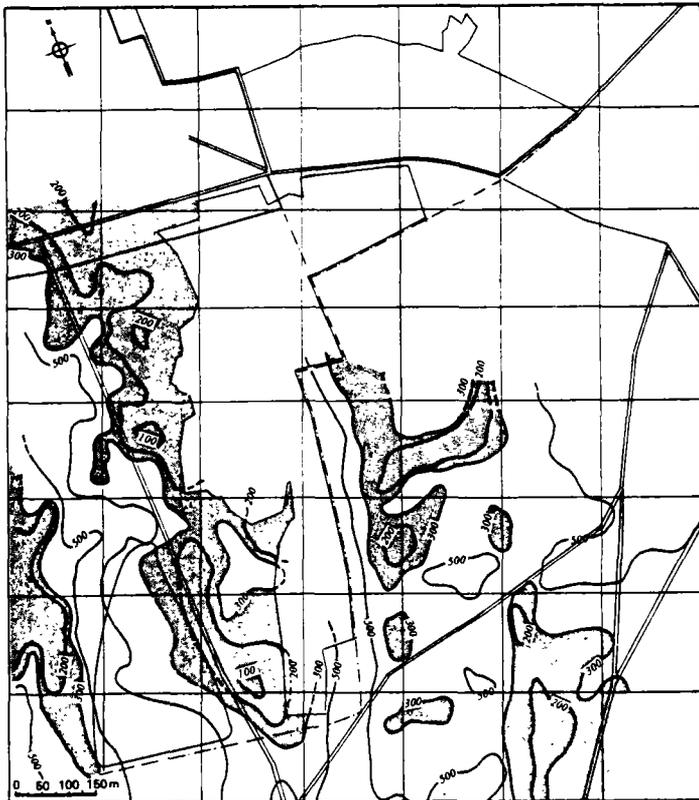


Fig. 13.2 — Courbes d'égale résistivité.

Réductions d'études simplifiées par rapport au document de base à l'échelle de 1/2 500.

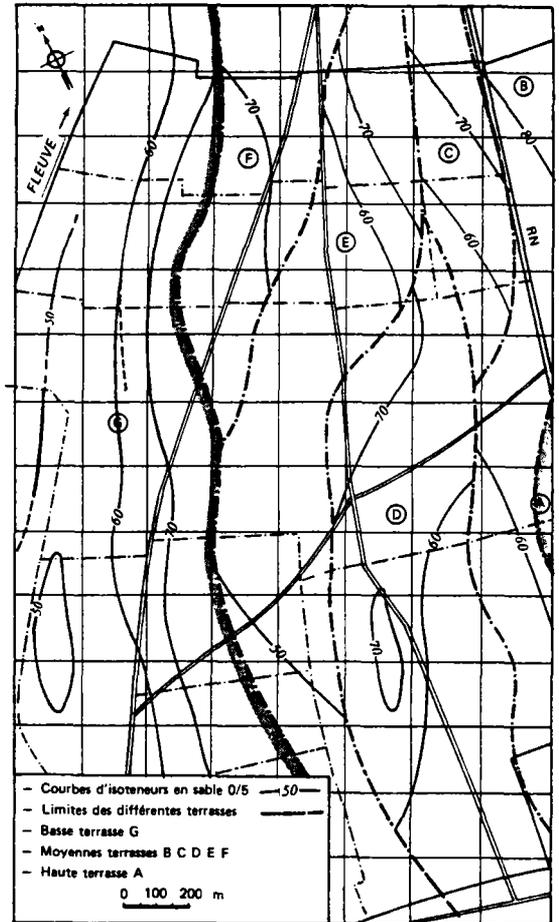


Fig. 13.3 — Isoteneurs en sable 0/5.

Réduction d'étude simplifiée par rapport au document de base à l'échelle de 1/5 000.

4.3.2. Gisements de roches massives

Les méthodes utilisées ont été largement développées dans les chapitres 3:1 et 4.2.2. Au stade de l'étude de détail, lorsque la zone a déjà été étudiée à une échelle moyenne (1/25 000 et 1/10 000) avec géophysique, on utilise directement les sondages. Par contre, si le site n'a pas été "dégrossi" au préalable, l'utilisation de la sismique réfraction et de la résistivité de surface est souvent bénéfique, en particulier pour situer les variations d'épaisseurs de découverte (et orienter ainsi la distribution des sondages), et détecter les zones broyées éventuelles (failles par exemple), que des profils "en étoile" permettent en général de bien mettre en évidence.

Compte tenu des surfaces couvertes relativement faibles à cette échelle (en roche éruptive ou métamorphique, les fronts de taille étant couramment de 30-40 mètres, un réservoir de 20 millions de tonnes correspond à une surface approximative de 30 hectares) et des risques importants d'hétérogénéités, il ne faut pas hésiter à resserrer les mailles de mesures.

Pour le trainé de résistivité, un pas de mesure de 30 m, suivant des lignes espacées de 20 à 50 m (suivant la structure du gisement) et au moins deux longueurs de ligne en chaque point (AB = 12 m et 30 m par exemple), permettent souvent d'avoir une bonne idée de la découverte et une première appréciation de la roche saine. Les sondages électriques peuvent également être utilisés pour évaluer l'épaisseur de la découverte. Les méthodes électriques ne sont évidemment valables que lorsque l'étude géologique préalable a laissé prévoir des contrastes de résistivité suffisants entre les différents terrains.

Les dispositifs sismiques peuvent être implantés, soit directement (sans géophysique électrique), soit après le dépouillement des trainés de résistivité ou des sondages électriques. Dans ce dernier cas, l'étalonnage est plus facile, car l'on connaît les zones à faible et à forte découverte. Il faut en général prévoir une densité moyenne de dispositifs de l'ordre de 5 à 10 à l'hectare prospecté.

Toujours dans l'hypothèse du site vierge de l'ordre de 30 hectares, il est généralement nécessaire de réaliser, après la géophysique de surface et avant les sondages destructifs complétés par la diagraphie, trois ou quatre sondages carottés pour préciser les caractéristiques du matériau sain (pétrographie - caractéristiques mécaniques) et

et pour "caler" la phase suivante, en descendant dans les trous qui ont servi aux sondages carottés les différentes sondes de diagraphie, et choisir ainsi les 2 ou 3 d'entre elles qui sont les plus discriminantes sur le site étudié.

Le corps de l'étude est réalisé à l'aide du couple sondages destructifs - diagraphies (cf. 3) La maille utilisée est bien entendu variable en fonction des données de la géophysique, mais est généralement à ce stade d'étude d'au moins 1 sondage par hectare. En fait, la densité des sondages dépendant beaucoup de leur coût, on peut serrer la maille de mesure lorsqu'il s'agit de l'extension d'une carrière ou lorsque l'exploitant qui fait l'étude dispose à peu de distance du site, d'un marteau perforateur. Dans ce cas, fréquent, puisque ce matériel est le même que celui qui sert à réaliser les trous pour tirs de mines, il est souvent possible (surtout sur sites hétérogènes) de réaliser 3 ou 4 sondages par hectare.

5 - COUT DES ETUDES DE RESSOURCES EN GRANULATS

Dans ce chapitre sont passés en revue les coûts correspondant aux différentes méthodes de prospection. On en déduira les coûts correspondant à différents types d'études de ressources en granulats. En conclusion, on essaiera de dégager des recommandations quant à l'utilisation optimale des moyens financiers dans l'inventaire des ressources en granulats.

3. 1 Coûts élémentaires des différentes méthodes utilisées :

Les données chiffrées ont été consultées principalement sur les tarifs pratiqués au B.R.G.M. et dans les Laboratoires des Ponts et Chaussées. On a également passé en revue un certain nombre de tarifs de bureaux d'études privés ainsi que les éléments de coût des devis figurant dans les propositions d'opérations présentées au Comité de gestion de la taxe parafiscale sur les granulats.

Les prix correspondant aux différentes méthodes se décomposent de la manière suivante :

- coûts de personnel évalués au temps passé et comprenant, outre la rémunération et les charges afférentes au personnel considéré, certaines prestations annexes qui, selon les cas peuvent être : frais de déplacement, de secrétariat ...
- coûts d'utilisation de matériel de transport, de matériel technique
- frais généraux (encadrement, charges diverses) et bénéfice de l'opérateur.

Pour les opérations répétitives présentant une certaine technicité : mesures géophysiques, essais géotechniques, les coûts sont souvent donnés par unité de travail : station de mesure, essai, en précisant les conditions de réalisation. En ce qui concerne les sondages, les tarifs s'appliquent habituellement au mètre d'avancement, avec des variations selon la profondeur. Il s'y ajoute souvent un élément fixe correspondant à la mise en place, sur le terrain, du matériel et du personnel qui le met en oeuvre.

Les coûts d'utilisation du personnel sont généralement voisins à qualification comparable, d'un bureau d'étude à l'autre. Par contre, il est assez difficile de comparer objectivement les coûts de mise en oeuvre de diverses techniques. En effet, les conditions de mise en oeuvre précisées avec les tarifs sont très différentes et difficilement réductibles les unes aux autres, d'un bureau d'étude à l'autre : interprétation comprise ou non, frais de transport compris ou non ...

Les coûts varient aussi en fonction des difficultés dues à la nature du terrain, en fonction des distances entre les points de mesure (géophysique) ou entre les points de sondages, en fonction du volume global des travaux à réaliser, etc. ... Pour des opérations importantes, il est possible d'obtenir des coûts unitaires moins élevés.

L'annexe n° 1 donne des ordres de grandeur de coûts élémentaires au début de l'année 1979.

5. 2 Coût des différents types d'études

Nous envisageons, ci-après, les différents niveaux pour lesquels les moyens d'étude ont été définis au chapitre précédent :

5. 2. 1 Niveau général : (Représentations à des échelles comprises entre 1/200 000 et 1/50 000) Stade A

Ce sont le plus souvent des études de cadrage ou de "recadrage" qui permettent, dans un vaste domaine, de circonscrire de manière assez large les zones susceptibles d'intérêt en vue d'une reconnaissance ultérieure. Il est possible que, dans le domaine considéré, certaines zones ou certains types de gisement soient déjà assez bien connus.

A ce niveau d'étude, on devrait systématiquement passer en revue tous les types de matériaux susceptibles de fournir des granulats. Il arrive cependant, pour des raisons diverses que l'on ne s'intéresse qu'à certains matériaux, par exemple les granulats alluvionnaires ; ceci peut être justifié seulement dans la mesure où l'on est déjà assuré - ce qui est loin d'être général - qu'ils constituent la seule ressource utilisable.

Le domaine d'étude à ce niveau général pourra être le département, le demi-département ou une superficie du même ordre, éventuellement une ou plusieurs vallées alluvionnaires. La superficie à étudier sera habituellement de quelques milliers de kilomètres carrés.

En annexe 1 a été chiffré le coût d'une étude générale portant sur une superficie de 2 000 km² environ et s'apparentant à l'étude à 1/100 000 réalisée dans la région Melun-Montereau.

Il ressort un coût au kilomètre carré d'environ 130 F. L'étude met en évidence les types de formations géologiques susceptibles de fournir des granulats, elle circonscrit leur occurrences et précise les qualités des matériaux correspondant à chaque formation géologique.

5. 2. 2 Niveau moyen : (Représentation à des échelles comprises entre 1/10 000 et 1/25 000) Stades B et C

Ce type d'études est utilisé en premier lieu pour circonscrire les zones favorables à l'exploitation (stade B) puis à préciser les secteurs où pourront être ouvertes les carrières (stade C) lors de l'élaboration de documents d'urbanisme. La précision varie selon qu'il s'agit d'un SDAU, d'un P.O.S. d'une ZAEC... Il porte sur un domaine de quelques centaines de kilomètres carrés au voisinage d'agglomérations, par exemple, zones à l'intérieur desquelles sont déjà circonscrits des secteurs d'intérêt possible dont l'extension se limite à quelques dizaines de kilomètres carrés. Voire quelques kilomètres carrés seulement pour les études à 1/10.000.

Souvent, il s'agit d'étudier l'extension de formations déjà exploitées en divers points. Cependant, de plus en plus fréquemment, on est amené à prospecter un type de matériau jusqu'alors peu utilisé en vue de remplacer des réserves en voie d'extinction.

Les annexes 3 et 4 montrent deux exemples théoriques de coûts d'opérations à l'échelle de 1/25.000 portant sur des superficies de l'ordre de 20 kilomètres carrés de gisements possibles. Le coût au kilomètre carré est évalué pour l'étude portant sur des matériaux alluvionnaires, à environ 23 000 Francs dans les deux cas et le coût à l'hectare de gisement reconnu s'élève à environ 1 000 francs en ce qui concerne le gisement alluvionnaire et entre 3 000 et 5 000 francs pour les gisements de roches massives.

Ramené au volume de matériau en place, étudié, le coût de l'opération est compris entre 1 et 2 centimes par mètre cube soit moins de 1 centime par tonne de granulats exploitables.

Il est à noter que le coût au kilomètre carré de gisement possible est à peu près 20 fois plus élevé pour des études au stade B que pour des études générales ceci, à cause de la densification de la maille d'observation et surtout à cause de l'intervention de moyens d'investigation souterraine : géophysique et surtout sondage.

Les études au stade C (échelle \sim 1/10.000) qui peuvent être nécessaires pour le choix des zones à exploiter représentent un coût complémentaire de 600 à 2 000 F par hectare étudié, soit 1 à 1,5 centime par mètre cube de matériau exploitable (voir annexes 5 et 6).

Les coûts indiqués pour les études à échelle moyenne ne doivent être considérés que comme des ordres de grandeur, les coûts réels peuvent être moindres lorsque de nombreuses données sont déjà disponibles ou si le gisement est très homogène et facile à appréhender. Par contre, dans le cas de gisements peu connus, entièrement masqués (alluvionnaires) ou encapuchonnés d'une épaisseur aléatoire de matériaux altérés (roches magmatiques) il peut être nécessaire de resserrer la maille de sondages, éventuellement d'utiliser simultanément plusieurs méthodes géophysiques d'investigation, pour définir les zones favorables à l'exploitation.

Au total, on peut estimer que les coûts réels d'investigation dans les études d'inventaire, à une échelle voisine de 1/20 000 peuvent aller de 10 000 à 40 000 F/Km² de gisement possible lorsque ce gisement a une épaisseur de l'ordre de 10 mètres. Pour des épaisseurs plus importantes, le coût sera plus élevé. Toutefois, il n'augmente pas en proportion de l'épaisseur des gisements ; en effet, la charge correspondant à la sélection des zones favorables (reconnaissance de l'épaisseur de la découverte, de la fracturation des matériaux ...) qui peut représenter entre la moitié et le tiers du coût de l'étude dans les exemples cités, reste fixe quelle que soit l'épaisseur de matériau exploitable.

En fait et paradoxalement, le coût réel d'une étude permettant la sélection de zones favorables à l'exploitation ne peut être déterminé a priori que dans la mesure où l'on connaît déjà assez bien les caractéristiques du gisement que l'on étudie (forme et maille des hétérogénéités, importance et incidences de la fracturation, allure du recouvrement ...).

En pratique, le projet d'étude est établi par l'opérateur sur des hypothèses concernant la géométrie des gisements et leurs caractéristiques principales. Dans la mesure où les hypothèses de départ se trouvent confirmées, les résultats de l'étude peuvent être conformes à ce qui était escompté. Par contre, si la complexité du gisement est plus grande que prévu, deux possibilités se présentent :

- ou le champ de l'étude est restreint et les méthodes sont adaptées pour répondre à l'objectif visé
- ou le champ de l'étude reste le même et, dans ce cas, les résultats risquent d'être difficilement exploitables : un complément d'étude s'avère alors nécessaire.

Seule une concertation constante entre le Service chargé du contrôle et l'opérateur d'une étude permet de pallier ces difficultés au fur et à mesure qu'elles se présentent et de réorienter éventuellement les travaux pour obtenir des résultats exploitables.

5. 2. 3 Etudes détaillées de gisement : (Représentation à des échelles de l'ordre de 1/1 000 à 1/5 000)

On supposera, dans ce cas, que l'exploitant qui effectue l'étude dispose déjà des résultats obtenus lors de la définition des zones favorables.

Les annexes 4 et 5 donnent le détail des coûts pour deux études détaillées respectivement sur un gisement alluvionnaire de 10 m d'épaisseur moyenne et sur un gisement de roches massives.

Les coûts à l'hectare varient de 5 000 à 12 000 francs selon les circonstances et ramenés au mètre cube de matériau en place, de 4,6 à 9 centimes.

On peut transposer au niveau des études détaillées de gisement certaines remarques faites pour les études au niveau moyen. Toutefois, dans les études détaillées, le degré d'incertitude est normalement beaucoup moindre lorsque la sélection des zones favorables a été faite au préalable dans de bonnes conditions.

Le problème consiste à étudier, d'une manière systématique, à maille serrée, les caractéristiques du gisement et des matériaux en vue de l'élaboration du plan d'exploitation et de remise en état des sols. On insistera ici encore sur la nécessité des études détaillées de gisement pour la prévision des possibilités et des conditions de remise en état des sols.

5.3. Coût des études déjà financées par la taxe parafiscale sur les granulats :

Entre octobre 1975 et octobre 1978, le Comité de gestion de la taxe a décidé de financer une centaine d'études de ressources en granulats.

Ces opérations ne se limitent généralement pas au seul inventaire physique des ressources. La plupart incluent une étude des contrantes et un certain nombre comprennent également un recensement des besoins.

Parmi les opérations terminées à l'heure actuelle, ont été examinées 24 opérations dont l'essentiel (au point de vue financement) consistait en un inventaire de ressources. Les Coûts s'établissent ainsi (actualisés en 1979)

- au km² de surface étudiée : 75 F à 30 000 F
- au km² de zone favorable reconnue : 5 300 F à 75 000 F
- au m³ de matériau reconnu : 0,07 à 1,7 centime.

En fait pour faire des comparaisons, il faut décomposer les études en fonction de l'importance de la zone étudiée :

- pour des superficies étudiées de 130 à 2 800 km² (études générales)
 - . coût au km² de surface étudiée : 75 à 1 750 F (moyenne 680 F)
- pour des superficies étudiées comprises entre 20 et 101 km²
 - . coût au km² de surface étudiée : 2 200 à 7 000 F (moyenne 3 800 F)
 - . coût au km² de zone favorable reconnue : 5 300 à 30 000 F (moyenne 12 400 F)
 - . coût au m³ de matériau reconnu : 0,15 à 1,3 centime (moyenne 0,6 centime)
- pour des superficies étudiées inférieures à 10 km²
 - . coût au km² de surface étudiée : 16 000 à 30 000 F (moyenne 20 000 F)
 - . coût au km² de zone favorable reconnue : 16 000 à 75 000 F (moyenne 39 000 F)
 - . coût au m³ de matériau reconnu : 0,3 à 1,7 centime (moyenne 0,9 centime)

Ces coûts sont donc très dispersés. Pour les superficies importantes (> 130 km²), il s'agit le plus souvent d'études générales assorties quelquefois de travaux sur le terrain pour identifier certains types de formations.

Pour les superficies de 20 à 101 km², il s'agit d'études au niveau moyen telles que définies dans ce rapport mais avec une maille de mesure inférieure ou très inférieure à celle proposée. Les études portant sur des superficies inférieures à 10 km² sont soit des reconnaissances relativement précises de secteurs favorables identifiés précédemment, soit l'étude de petits gisements compartimentés (vallée du Tarn).

Les études telles que proposées dans les paragraphes qui précèdent sont, pour les études de niveau moyen, d'un coût plus élevé que celui des études déjà effectuées. Ces dernières donnent en général une bonne évaluation globale des gisements mais le choix des zones favorables auxquelles elles devraient aboutir reste assez imprécis ; on circonscrit plutôt des zones présumées favorables. Cette indication, utile comme orientation en vue du choix de l'utilisation des sols reste généralement insuffisante s'il s'agit de délimiter précisément des secteurs affectés à l'implantation de carrières dans des plans d'occupation des sols.

5.4. Optimisation de l'emploi des moyens financiers dans l'inventaire des ressources en granulats :

Nous envisageons ici essentiellement les études générales et les études au niveau moyen qui reçoivent un financement sur fonds publics.

Une condition nécessaire au lancement d'études de ressources est l'existence de besoins en granulats actuelle ou prévisible. Il convient de les localiser et de les préciser autant que possible qualitativement et quantitativement.

Cette démarche étant faite, il est indispensable de bien préciser les objectifs à atteindre. C'est à ce stade qu'une étude générale - si elle n'a pas été menée précédemment - peut être nécessaire pour préciser les objectifs. Elle permettra d'indiquer les types de matériaux susceptibles d'intérêt, leur situation générale, les contraintes principales : occupation des sols, distances, problèmes d'environnement, tous éléments avec lesquels il sera possible de circonscrire un périmètre pour les études au niveau moyen destinées à mettre en évidence les zones favorables susceptibles d'être réservées à l'exploitation des granulats.

Dans l'optique des seuls problèmes d'approvisionnement, il n'apparaît pas nécessaire d'entreprendre des études relativement détaillées de réserves qui seraient seulement exploitées à long terme : plus de 15 ans. Par contre, dans le cadre de plans d'urbanisme ou de plans d'aménagement qui engagent l'utilisation des sols pour une longue - voire une très longue - période, il est impératif que les potentialités en matériaux, notamment en granulats soient prises en compte et ceci, à une échelle compatible avec celle du document d'aménagement. (Etudes au stade B et C)

On obtiendra les résultats les meilleurs, dans l'inventaire des ressources, si l'on connaît bien au départ les difficultés d'investigation en l'occurrence les caractéristiques des gisements que l'on étudie.

Là aussi, une étude préliminaire apporte des indications permettant d'apprécier les problèmes à résoudre. Souvent, cependant, les problèmes que pose la prospection apparaissent lors du déroulement des travaux : par exemple, un gisement très hétérogène exigera une maille de reconnaissance plus serrée, donc un volume plus important de travaux pour aboutir à la définition de zones favorables. Il convient alors, pour obtenir des résultats exploitables, que les moyens mis en oeuvre puissent être adaptés, ceci en concertation avec le Service chargé du contrôle de l'étude.

Pour optimiser l'utilisation des fonds, il nous apparaît nécessaire que, d'une manière générale, les études entreprises soient menées jusqu'au stade de la définition des zones favorables à l'exploitation. En effet, une première étude disposant de moyens insuffisants fournira seulement des indications générales ne permettant pas de circonscrire des gisements exploitables. Il y a des chances pour qu'une telle opération doive être complétée ultérieurement par une deuxième étude. Une partie de l'information intermédiaire recueillie lors de la première étude se trouvera perdue parce que peu utilisable au niveau de la synthèse.

Il est donc nécessaire de recueillir à nouveau cette information pour réaliser la deuxième étude ... et ce processus peut être répété plusieurs fois, ce qui représente un gaspillage.

Au niveau des études destinées au choix de secteurs susceptibles d'être exploités, mieux vaut limiter le champ des études (et concentrer les moyens) pour en obtenir des résultats significatifs qu'élargir leur domaine (saupoudrer les moyens) et risquer de n'obtenir que des résultats partiels qu'il sera nécessaire de compléter.

La possibilité d'ouvrir des carrières dans des gisements exploitables dépend des contraintes d'occupation des sols et d'aménagement. La concentration des moyens, donc l'augmentation des coûts au kilomètre carré dans les études de ressources se justifie dans la mesure où elles s'imbriquent étroitement avec les études de contraintes et les études d'aménagement. La confrontation des différentes données oblige en effet à des choix et il est préférable, pour optimiser les coûts, que les arbitrages interviennent dans le déroulement de l'étude plutôt qu'à posteriori. Ceci exige, lors du montage d'une étude de ressources, de prévoir un phasage de l'opération tel que les choix puissent s'exercer au moment opportun.

- CONCLUSIONS

Le présent travail méthodologique sur l'inventaire des ressources en granulats expose les motivations et les objectifs de ces études ainsi que leur champ d'application. Il indique quels en sont les utilisateurs et les conditions dans lesquelles elles doivent être réalisées.

Les principales méthodes de prospection des gisements de granulats sont passées en revue : levés géologiques, prospection géophysique, sondages, essais géotechniques.

Quatre niveaux d'étude ont été définis et, pour chacun d'eux, les moyens à employer et la maille des observations, des mesures géophysiques, des sondages.

Le niveau général constitue une première approche. Il a surtout pour but de caractériser les différents types de ressources à l'intérieur de domaines assez vastes, en utilisant au maximum la documentation existante. Il aboutit à des documents cartographiques à petite échelle.

Au niveau moyen, les différentes techniques de géophysique et de sondage peuvent être mises en oeuvre. Les études à l'échelle de 1/25 000 sont destinées à faire un classement des gisements selon leur intérêt en vue d'orienter les choix d'utilisation du sol. Les études à l'échelle de 1/10 000 utilisent les mêmes méthodes avec une maille de mesures plus serrée; elles ont pour but de préciser les caractéristiques des gisements exploitables en vue de la définition des zones dans lesquelles pourront être ouvertes les carrières.

Les études générales ainsi que les études au niveau moyen sont susceptibles d'être réalisées sur fonds publics car leurs résultats intéressent la collectivité.

Les études détaillées de gisement sont généralement effectuées par les exploitants de carrière en vue d'acquérir les données nécessaires à la conduite de l'exploitation et à la remise en état des terrains. Elles utilisent de manière systématique la prospection géophysique et les sondages.

Le coût des études de ressources en granulats varie dans des proportions considérables selon la complexité des gisements et le degré de finesse des études. Quelques exemples sont donnés pour fixer les ordres de grandeur.

Selon le contexte, il sera nécessaire d'obtenir un degré de finesse plus ou moins grand dans l'inventaire des ressources en granulats. En particulier, l'aménagement du territoire requiert les études les plus détaillées dans les zones de forte concurrence pour l'occupation des sols.

L'utilisation optimale des moyens impose que les contraintes diverses et les données d'aménagement soient prises en compte dans l'inventaire des ressources en granulats.

Données sur les coûts élémentaires
Tarifs pratiqués en janvier 1979

(Coûts présentés à titre indicatif)

Personnel :

Ingénieur confirmé :.....	1 700 à 1 900 F
Ingénieur d'étude :.....	1 400 à 1 500 F
Technicien supérieur :	1 100 à 1 200 F
Technicien :	800 à 900 F

Géophysique :

Trainés de résistivité :

Mise en place et repli :.....	1 500 à 4 000 F (1)
Station de résistivité sur profils : (2 longueurs de ligne)	60 à 200 F selon le pas de mesure (80 à 120 F pour un pas de 50 m)

Sondages électriques :

(petite longueur de ligne ($AB/2 \leq 100$ m))

Mise en place et repli :	1 500 à 4 000 F (1)
Sondage :	500 à 700 F

Sismique marteau :

~ 300 F/station

Sismique réfraction : "grande profondeur"

Mise en place et repli :	~ 7 000 F
Station isolée :	1 500 - 2 400 F
Profils continus : (par km de profil)	~ 17 000 F (espacement des géophones 5 m) 12 000 F (espacement des géophones 10 m)

1 Ce poste est fonction de la distance entre le siège de l'entreprise et le terrain à explorer.

Diagraphies : (forages courts < 100 m)

P.S. - résistivité, γ , γ - γ
neutron-neutron, log sonique

Mise en place et repli :.....	1 500 à 4 000 F (selon distance)
Prix à la journée :.....	2 600 pour 1 outil 3 100 pour 3 outils
Prix au mètre de forage : 1 outil :	30 à 40 F
2 outils:	50 à 60 F
3 outils:	60 à 70 F

Sondages mécaniques : (2)

Matériaux meubles :

Tarière continue	100 à 200 F/m
Tarière Highway	4 500/jour (120 à 200 F/m)
V.P.R.H.....	4 500 F/jour (130 à 170 F/m)
Percussion-soupape.....	400 à 500 F/m
Benne-Benoto.....	> 350 F/m

Roches massives :

Forage au marteau (drill).....	110 à 180 F/m
Sondage carotté.....	500 à 800 F/m

Essais de laboratoire :

- lames minces, confection et étude rapide..... 210 à 260 F/unité
- Granulométrie :
 - de 1,5 à 80 μ 160 F / échantillon

(2) Prévoir en plus l'amenée et le repli du matériel et le déplacement d'un trou à l'autre éventuellement.

< 2 mm :	~ 110 F/échantillon
<20 mm :	~ 200 F/échantillon
>20 mm :	~ 410 F/échantillon
Equivalent de sable :	85 à 105 F
Los Angelès :	250 à 340 F
Microdeval :	250 à 340 F
Fragmentation dynamique :	200 à 300 F
Friabilité des sables :	250 à 340 F
Densité apparente :	~ 45 F
Masse volumique :	~ 100 F
Porosité :	~ 100 F

Etude générale pour une superficie de l'ordre de 2 000 km²

(1 coupure à 1/100 000) Stade A

- Compilation des données existantes :

- 10 jours ingénieur	19 200] 42 800 F
- 20 jours technicien	23 600	

- Etude géologique :*Géomorphologie :*

- 15 jours ingénieur	28 800] 95 200 F

Levés de terrain :

- 10 jours ingénieur	19 200
- 40 jours technicien	47 200

- Laboratoire :*Alluvionnaire :*

- 40 granulo x 300	12 000] 29 200 F
- 15 identifications pétro	9 600	
- 20 essais mécanique (LA + MDE)	7 600	

Roches massives :

- 30 examens pétro	9 000] 20 400 F
- 30 essais mécaniques (LA + MDE)	11 400	

187 600 F- Synthèse + rapport :

- 25 % des travaux précédents	46 900	46 900 F
-------------------------------------	--------	----------

264 500 F

Coût au kilomètre carré étudié ~~##~~ 132 F sans travaux de géophysique ni de sondage.

Définition des zones favorables à l'exploitation sur un tronçon de vallée de 20 km²

comportant 20 km² de gisement possible, avec une épaisseur moyenne d'alluvions de l'ordre de 10 mètres - (indications d'ordre général sur les coûts)

- Echelle : 1/25.000 - Stade B -

- 1° phase : Documentation et levés géologiques

- 4 jours d'ingénieur 7 680 F
- 15 jours de technicien supérieur 17 700 F

- 2° phase :

2.1. Réalisation de traînés électriques

à 2 longueurs de ligne :

maille 100 m x 200 m

1 000 points de mesure 100 000 F

2.2. sur 5 km² supposés favorables (25 % de la surface du gisement initialement possible).

1 sondage/3 ha

↓	160 sondages =	32 en gros Ø → 320 x 200 = 64 000 F
	de 10 m	128 rarière petit Ø → 1280 x 130 = 166 400 F

Essais : 100 granulo	}	>	50 000 F
50 ES.			
20 Essais mécaniques			
5 pétro.			

405 400 F

- Synthèse + Rapport..... 54 600 F

460 000 F

Gisement possible : 20 km² :

. Coût rapporté au km² de gisement possible : $\frac{460.000}{20} = 23.000$ F.

Gisement étudié en détail (25 % de la surface initiale) défini en fonction des études techniques et des études de contraintes effectuées par ailleurs.

. Coût rapporté à l'hectare de gisement étudié en détail : $\frac{460.000}{500} = 920$ F

Gisement exploitable : 75 % de la superficie étudiée en détail :
épaisseur moyenne supposée égale à 8 m.

. Coût rapporté au m³ de granulats exploitables en place :

$$460.000 / [(500 \times 80.000) \times 0,75] \leq 2 \text{ centimes/m}^3$$

Définition de zones favorables à l'exploitation de roches massives calcaires pour l'alimentation d'un SDAU - Epaisseur utile de calcaire supposée de l'ordre de 25 m. (indications générales sur les coûts)

Echelle 1/25 000 - Stade B - Aire d'affleurement du calcaire : ~ 20 km²

- 1^o phase : Documentation

- 5 jours ingénieur	9 500] 15 400] 58 300
- 5 jours technicien supérieur	5 900		
: <u>Levés géologiques - Echantillonnage</u>			
- 10 jours ingénieur	19 200	] 36 900
- 15 jours technicien supérieur	17 700		
: <u>Essais mécaniques</u>			
15 x 400	6 000		

- 2^o phase : Etude sur 8 sites totalisant 500 ha (25 % de la surface initiale)

- 60 sondages électriques	42 000] 365 100	
<u>Sélection de 4 sites de 50 ha (10 % de la surface initiale)</u>			
- Exécution de 12 km de profils sismiques (12 000 x 12) + 7 200	151 100		
- 4 sondages carottés de 25 m 100 x 700	80 000		
- 20 sondages marteau + diagraphies 500 x 160	80 000		
- Essais mécaniques 30 x 400	12 000		
- <u>Interprétation et synthèse</u>	51 600		
			475 000

Gisement possible : 20 km²

. Coût rapporté au km² de gisement possible : $\frac{475.000}{20} = 23.750 \text{ F}$

Gisement étudié en détail en 2 stades : (25 % puis 10 % de la surface initiale) défini en fonction des études techniques et des études de contraintes effectuées par ailleurs.

. Coût rapporté à l'hectare de gisement étudié en détail :

475.000 / (3x50 ha) ou (2x50 ha) = 3 166 à 4 750 F/ha.

Gisement exploitable : 2 ou 3 sites de 50 ha avec une épaisseur de matériaux de 25 m. en moyenne - . Coût rapporté au m³ de granulats exploitables -

475.000 / (3x500.000x25) } ≠ 1,3 à 2 centimes/m³
475.000 / (2x500.000x25)

Choix de zones favorables à l'exploitation sur des zones délimitées à 1/25.000
comme favorables, sur 3 km²: - échelle 1/10. 000 - stade C -

(surcoûts par rapport aux études à 1/25.000 du stade B)

- 1° phase :

- étude des résultats obtenus précédemment à 1/25.000

2 jours ingénieur..... 3 840 F

- 2° Phase :

2.1. Réalisation de trainés électriques

à 2 longueurs de ligne :

maille 50 x 200 m (complément à
l'étude au 1/25.000)

300 points de mesure..... 30.000 F

2.2. Sondages :

1 sondage / 3 ha

↓		
100 sondages	}	5 en gros Ø → 50 m x 200 = 10.000 F
de 10 m		95 en petit Ø → 950 m x 130 = 123.500 F

Essais : 100 granulo

50 E.S.

10 essais mécaniques

..... 25.000 F

- Synthèse + Rapport..... 37.600 F

200.000

Gisement étudié en détail : 300 hectares

. Coût complémentaire à l'hectare étudié (surcoût par rapport aux études du
stade B à 1/25.000) : $\frac{200.000}{300} = 660$ F

Gisement exploitable : supposé représenter 80 % de la surface étudiée avec
une épaisseur moyenne de 8 m.

. Coût complémentaire rapporté au m³ de granulat exploitable :

$200.000 / [(300 \times 80.000) \times 0,80] \neq 1,1$ centime/m³

Choix de zones favorables à l'exploitation de roches massives sur 3 sites étudiés à 1/25.000 totalisant 120 hectares : échelle 1/10.000 - stade C (surcoûts par rapport aux études à 1/25. du stade B)

- 1° phase :

- étude des résultats obtenus précédemment
à 1/25.000
2 jours ingénieur 3 840 F

- 2° phase :

2.1. Exécution de 7 km de profils sismiques
(12.000 x 7) + 7.200 91.200 F

2.2. Sondages :
2 sondages carottés de 30 m
60 x 700..... 42.000 F

10 sondages marteau + diagraphies :
250 x 160 40.000 F

2.3. Essais de laboratoire : (essais mécaniques)
20 x 400 8.000 F

2.4. Interprétation et synthèse 44.960 F

230.000 F

Gisement étudié en détail : 120 hectares

. Coût complémentaire à l'hectare étudié (surcoût par rapport aux études du stade B à 1/25.000) : $\frac{230.000}{120} = 1\ 916\text{ F}$

Gisement exploitable : supposé représenter 80 % de la surface de 2 des 3 sites étudiés, sur 25 m. d'épaisseur moyenne.

. Coût complémentaire rapporté au m³ de granulat exploitable :

$230.000 / [(2 \times 400.000) \times 25 \times 0,8] \approx 1,5\text{ centime/m}^3$

Etude détaillée de gisement alluvionnaire : stade D

à 1/2 000 sur 20 hectares reconnus favorables par étude à 1/25.000

	a/	b/ variante
- Topographie	15 000	15 000
- Géophysique :		
- Trainées de résistivité (2 longueurs de ligne)		
Maille 25 x 25 m 7 profils/8	306 points à 75 F + 3 000 F	25 950 25 950
- Sondages tarière :		
. petit diamètre		
Maille 100 x 100 25 trous de 100 m	25 trous de 10 m	250 m à 130 F + 2 000 F
. Benoto ou pièges à graves		
5 trous de 10 m = 50 m x 350 F + 1 500 F	19 000	0
. Essais géotechniques		
20 granulo à 300 = 6 000		
4 "essais mécaniques à 400 = 1 600	8 600	3 000
10 E.S. à 100 = 1 000		
- <u>Suivi - Synthèse - Rapport</u>	16 950	16 050
	118 000	99 000

Coût à l'hectare de gisement étudié en détail : 4 950 à 5 900 F

Coût au m³ de matériau exploitable, en place :

$$\frac{115\ 000}{99\ 000} \Big| : (200\ 000 \times 8\ \text{m} \times 0,8) = 7,7 \text{ à } 9 \text{ centimes/m}^3$$

Etude détaillée d'un gisement de roches massives : stade D

à 1/2 000 sur 20 hectares reconnus favorables par étude à 1/25.000

		Variante
- Topographie	15 000	10 000
- Géophysique :		
- Sondage électrique :		
Maille 50 x 100		
50 S.E. à 750 F	35 000	
+ 3 000		
ou		
- Résistivité		
Maille 25 x 50 m		
176 S.E. à 75 F		20 600
+ 300		
- Sondages carottés (1)		
2 sondages de 35 m = 70 m		
à 700 F/m	51 000	51 000
+ 2 000 F		
- Sondages marteau + diagraphies :		
18 x 30 m = 540 m à 170 F	91 800	
	+ 2 000	63 200
- Essais mécaniques		
- Observation pétrographique :	3 000 F	
- 20 Essais mécaniques à 400	8 000 F	
	11 000	7 000
- Suivi - Synthèse - Rapport	33 700	33 400
	240 000	185 000

Coût à l'hectare de gisement étudié en détail : 9 250 à 12 000 F

Coût au m³ de matériau exploitable, en place :

240 000	| : (200 000 x 25 x 0,8) = 4,6 à 6 centimes
185 000	

(1) Cas où l'on ne dispose pas de front de taille ancien.

B I B L I O G R A P H I E

- C. ARCHIMBAUD, Y. MARTIN-GUTILLOU ; Influence des caractéristiques des gisements sur la conception des installations. Bull. Liaison L.P.C. N° Spécial Granulats - Juin 1977.
- C. ARCHIMBAUD, B. GRIVEAUX, M. RAT ; Reconnaissance des gisements rocheux - Méthodes actuelles. Bull. Liaison L.P.C. N° Spécial Granulats - Juin 1977.
- C. ARCHIMBAUD, B. GRIVEAUX, J. PEYBERNARD, M. RAT ; Reconnaissance des gisements rocheux - Perspectives nouvelles. Bull. Liaison L.P.C. N° Spécial Granulats - Juin 1977.
- J. AUBERT, J.M. LORAIN ; Calcaires lacustres de la région parisienne. Bull. Liaison L.P.C. N° Spécial Granulats - Juin 1977.
- B.R.G.M. - L.P.C. ; Carte des ressources en granulats de la région Melun-Montereau (1971).
- V. BERTON ; Projet de programme pour l'inventaire général des granulats en France - B.R.G.M. - Rapport 1970 inédit.
- J. CAUVIN, M. LESAUVAGE ; Principales caractéristiques des alluvions de la Marne. Bull. Liaison L.P.C. N° 55 - octobre-novembre 1971.
- M. CHAMPION, Ph. MAILLARD, P. CARTO ; Les alluvions de la Loire dans la région Centre - Inventaire de la production et des gisements. Bull. Liaison L.P.C. N° 56 - Décembre 1971.
- G. CHEVASSU ; Géophysique de surface appliquée à la reconnaissance de gisements de roches massives. Bull. Liaison L.P.C. N° 67 - Octobre-novembre 1973.
- A.P. CRESSARD, G. CHEVASSU, J. LE BRIS ; Identification géotechnique des matériaux dans le cadre d'une recherche de granulats marins. Bull. Liaison L.P.C. N° Spécial Granulats - Juin 1977.
- A.P. CRESSARD, J. LEMAIRE, J.P. LENOBLE ; Les granulats siliceux et calcaires du littoral français. Bull. Liaison L.P.C. N° Spécial Granulats - Juin 1977.
- M. DORTDOT, M. LESAUVAGE ; Etude des matériaux alluvionnaires de la vallée de l'Yonne. Bull. Liaison L.P.C. N° 69 - Janvier-février 1974.
- M. DORTDOT, S. RESENDE ; Etude des gisements de matériaux alluvionnaires pour la préparation d'un SDAU. Bull. Liaison L.P.C. N° Spécial Granulats - Juin 1977.
- R. FERRANDES ; Utilisation des méthodes géophysiques dans la recherche et l'étude des matériaux de carrière - B.R.G.M. - Chronique des matériaux de carrière - 1974.
- J.M. GEOFFRAY, A. MISHPELLAN, J. RESTITUITO ; Basaltes et pouzzolanes du Massif Central. Bull. Liaison L.P.C. N° Spécial Granulats - Juin 1977.
- B. GRIVEAUX, A. MALDONADO ; Schéma-type d'étude de carrière. Bull. Liaison L.P.C. N° 57 - Janvier-février 1972.
- B. GRIVEAUX ; Rôle des failles dans l'exploitation des roches massives. Bull. Liaison L.P.C. N° 73 - septembre-octobre 1974.
- B. GRIVEAUX ; Essai de fragmentation dynamique modifié sur les éclats de sondage destructif. Bull. Liaison L.P.C. N° 82 - Mars-avril 1976.
- H. HAVARD, N. MIGNOT, M. PÔTDEVIN ; SYGFRID pour la gestion sur ordinateur d'un fichier géotechnique de granulats. Bull. Liaison L.P.C. N° 84 - Juillet-août 1976.
- R. HORN, F. MERCIER ; Possibilités de la sismique réflexion continue dans l'étude qualitative des matériaux dragables - B.R.G.M. - Rapport 1974 inédit.
- J. HOLEF ; Les sables fins du Nord-Est du Bassin Parisien. Prospection et étude détaillée des gisements. Bull. Liaison L.P.C. Supplément au N° 33 - Septembre 1968.

INSTITUTE OF GEOLOGICAL SCIENCES : Assessment of British Sand and Gravel resources (1971, 1972, 1973) :

- The sand and gravel resources of the country around Witham, Essex - Description of 1 : 25 000 resource sheet TL 81,

- The sand and gravel resources of the country around Hethersett, Norfolk - Description of 1 : 25 000 resource sheet TG 10.

C. JAVEY ; Cartes des ressources en matériaux de construction et de viabilité - Les Andelys 1/50 000 - B.R.G.M. - Rapport inédit 1971.

J.P. JOUBERT, C. TOURENQ ; Instruction ministérielle provisoire sur les granulats. Bull. Liaison L.P.C. N° 94 - 1978.

G. OLIVIER ; Les comptages pétrographiques dans les granulats. Bull. Liaison L.P.C. N° 83 - Mai-juin 1976.

G. OLIVIER ; Ressources en matériaux de la Savoie. Bull. Liaison L.P.C. N° Spécial Granulats - Juin 1977.

A. PRAX - L. PRIMEL ; Prospection des gisements alluvionnaires. Bull. Liaison L.P.C. N° Spécial Granulats - juin 1977.

A. PRAX ; Modalités de traitement des matériaux alluvionnaires - RGRA N° 481 - Novembre 1972 p. 60-76.

L. PRIMEL ; Problèmes posés par l'identification des calcaires dans les sables et graviers. Bull. Liaison L.P.C. Supplément au N° 33 - Septembre 1968.

L. PRIMEL ; Recherche sur l'évolution des propriétés des matériaux alluvionnaires dans un bassin et mise en évidence de quelques caractéristiques générales. L.C.P.C. - Rapport de recherche N° 1 - Janvier 1969.

L. PRIMEL ; Les gisements de sables en France. Journées d'information "traitement des sables pour assises de chaussées". Bordeaux - Novembre 1976.

L. PRIMEL ; Les bilans de ressources en granulats. Bull. Liaison des L.P.C. N° Spécial Granulats - Juin 1977.

J. ROBERT ; Etude des matériaux alluvionnaires de la Haute-Garonne. Bull. Liaison L.P.C. N° 68 - Novembre-décembre 1973.

ILLUSTRATIONS : Les photographies et figures sont extraites du numéro spécial "Granulats" du Bulletin de Liaison des L.P.C. - Juin 1977 ainsi que de la Revue Générale des Routes et aérodromes N° 481 à l'exception des photographies de la page 14.1. et de la figure 5 (photos M. RAT).