

LA TOPOGRAPHIE DES CAVITES

DE LA REGION PARISIENNE

I) LES EFFONDREMENTS DE CARRIERE	3
1) FONTIS ET EFFONDREMENTS	3
2) CATASTROPHES EN SERIE	3
3) L'EFFONDREMENT DE CLAMART.....	4
4) RISQUES ACTUELS	4
5) LA CREATION DE L'INSPECTION DES CARRIERES.....	5
6) GRANDS TRAVAUX.....	6
7) LA METHODE GUILLAUMOT	6
II) LE NIVELLEMENT DE PARIS.....	7
1) NIVELLEMENT EN SOUS-SOL.....	7
2) PARIS COULE-T-IL ?	9
III) METHODES DE DETECTION DES VIDES	10
1) LES DONNEES CARTOGRAPHIQUES	10
2) LA PHOTO-INTERPRETATION.....	11
3) LA TELEDETECTION	12
2) METHODES DE PROSPECTIONS GEOPHYSIQUES	14
A) <i>GRAVIMETRIE</i>	15
B) <i>LES METHODES ELECTRIQUES</i>	15
C) <i>LES METHODES ELECTROMAGNETIQUES</i>	16
D) <i>LES METHODES SISMIQUES</i>	16
E) <i>METHODES MAGNETIQUES</i>	17
F) <i>LES FORAGES</i>	17
G) <i>CONCLUSION</i>	18
IV) CONCLUSION	19
V) BIBLIOGRAPHIE.....	20

En couverture : graffiti représentant un géomètre (effectuer par un carrier)

Ensemble des vides du sous-sol de la capitale



I) LES EFFONDREMENTS DE CARRIERE

Le destin inéluctable d'une carrière souterraine laissée à l'abandon est de s'affaisser... à plus ou moins longue échéance suivant l'ampleur de ses cavités, la nature de la roche exploitée et la qualité des couches supérieures. L'événement se présente sous la forme d'un fontis ou d'un effondrement.

1) FONTIS ET EFFONDREMENTS

On appelle fontis le creusement de bas en haut des terres sous-jacentes au toit d'une carrière, sous l'action d'une fracture naturelle (tectonique) ou anthropique (fragilisation par des tirs de mine, par exemple) aidée généralement de venues d'eau. Quand le sommet de la cloche atteint la surface, ce qui peut prendre des années ou des siècles, le fontis vient au jour en engloutissant tout ce qui est au-dessus de lui. Le mouvement est accéléré dans les anciennes exploitations de pierre à plâtre où l'éboulement de l'épaisse couche de sable surmontant les carrières de gypse intervient rapidement après la venue au jour du fontis.

L'effondrement, qu'il soit partiel ou général, est dû à la rupture brusque des bords fermes de la dalle rocheuse au-dessus de vides dont les supports (piliers, étais...) sont surchargés. Il s'agit, dans sa forme aiguë, d'un phénomène extraordinairement brutal, l'air contenu dans les galeries se comprimant en quelques instants avant de s'éjecter avec une violence inimaginable par les tunnels d'accès, les cheminées d'aéragé ou d'extraction, et de tout emporter sur son passage.

2) CATASTROPHES EN SERIE

Les effondrements sont aussi vieux que les carrières mais sont cités pour la première fois par un arrêt du Parlement du 17 mars 1564 montrant que le fontis était déjà un risque connu. Ces événements, ruinant chemins, bâtiments etc.

En 1623, un fontis vint autour dans le jardin du monastère des Feuillantines dont les fondations étaient à peine achevées. Dans son *Tableau de Paris*, Louis Sébastien Mercier rapporte "l'enfoncement" des remises d'une maison de la rue d'Enfer en avril 1777 et l'engloutissement, le 27 juillet 1778, de sept personnes à Ménilmontant, au niveau de l'actuelle rue Boyer. Le 9 mai 1879, trois maisons du passage Gourdon, aujourd'hui villa Saint-Jacques, s'effondrèrent, heureusement

sans faire de victimes. Les anciennes carrières, 20 mètres en contrebas, s'étaient écroulées, peut-être sous l'action des vibrations provoquées par le passage des trains de la ligne de Sceaux voisine. Le 31 octobre 1909, la chaussée de la rue Tourlaque, à l'aplomb d'anciennes exploitations de gypse, se déroba sous les pieds de deux passants...

3) L'EFFONDREMENT DE CLAMART

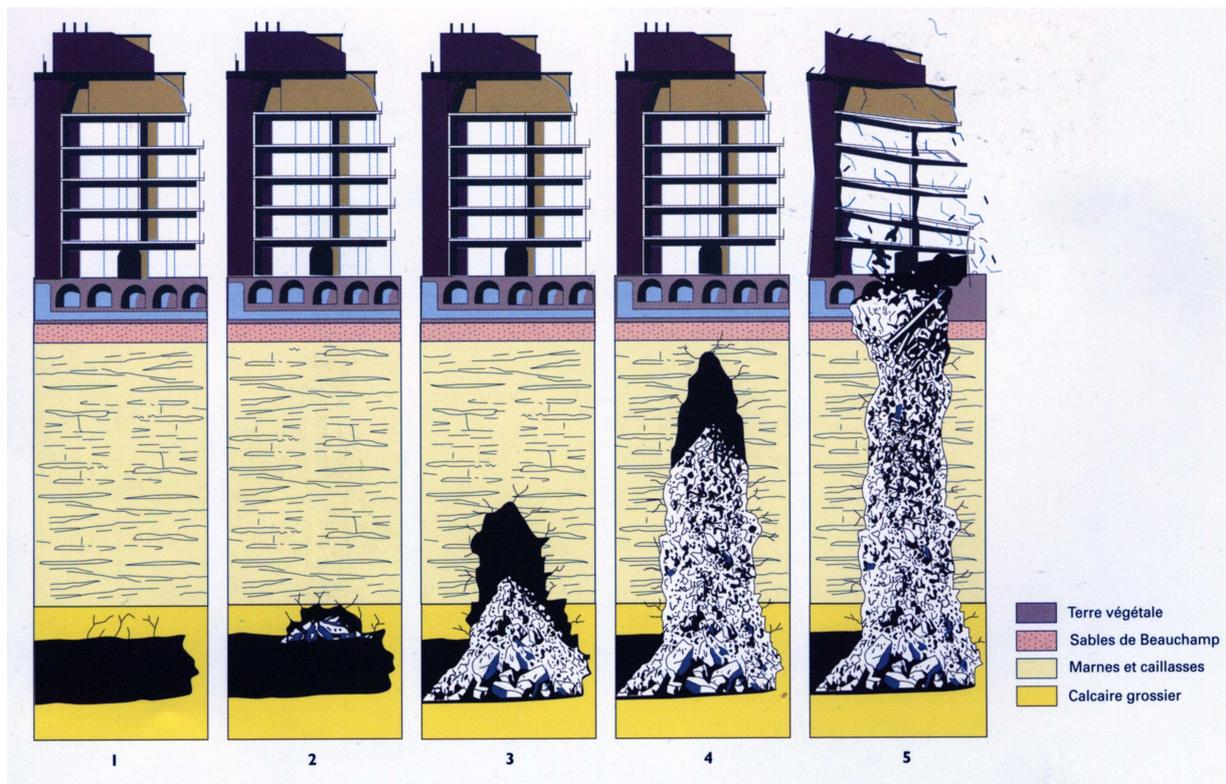
Les carrières de craie, répandues dans la proche couronne parisienne, ont fréquemment été le théâtre de vastes effondrements en raison de la fragilité de la roche ; ils furent la plupart du temps sans grande gravité dans la mesure où ils affectaient des terrains inhabités. Ce ne fut pas le cas le 1^o juin 1961, quand un effondrement spectaculaire survint à la limite de Clamart et d'Issy-les-Moulineaux. Un énorme grondement souterrain, semblable à celui d'un tremblement de terre, précéda l'effondrement du sol de 2 à 4 mètres sur une superficie de 3 hectares.

Six rues disparurent et le terrain du stade d'Issy-les-Moulineaux fut transformé en un paysage lunaire. On dénombra vingt et un morts, quarante-cinq blessés, plus de deux cent soixante-treize sinistrés et vingt-trois immeubles détruits. Cette catastrophe faisait suite à des pluies abondantes ; elles grossirent une nappe perchée dominant l'ancienne exploitation, et cette surcharge fut fatale au premier étage de la carrière, dont les piliers étaient de dimensions insuffisantes.

4) RISQUES ACTUELS

Le sol parisien est plutôt sûr avec une réserve pour Montmartre dans la mesure où de considérables chantiers de conformation ont été menés depuis Louis XVI. Par ailleurs, la ville est couverte d'un voile de béton et de macadam dérivant dans les égouts les eaux fluviales qui étaient souvent un acteur du processus de dégradation et de déstabilisation du sous-sol.

Cependant les Franciliens se rappellent régulièrement qu'ils vivent en permanence sur des cavités, parfois de manière catastrophique comme à Chanteloup-les-vignes, en 1991, avec un fontis de 20 mètres de large. Malgré une politique systématique de comblement, huit à douze fontis apparaissent chaque année. Les incidents sont heureusement, la plupart du temps, sans grande gravité et se limitent à quelques affaissements limités ou à de simples fissures dans les constructions.



Formation progressive et venue au jour d'un fontis

5) LA CREATION DE L'INSPECTION DES CARRIERES

En dépit d'initiatives encore isolées, Paris reposait au XVIII^e siècle sur d'immenses gouffres. Ces vides, consécutifs à une exploitation intensive des carrières, n'étaient pas accessibles pour la plupart, ni même repérés. La fréquence des effondrements et leurs conséquences de plus en plus importantes à mesure de l'extension de la ville incitèrent Louis XVI à créer, le 4 avril 1777 une "inspection des carrières" dirigée par le grand architecte des bâtiments royaux, Charles Axel Guillaumot.

La mission de ce nouveau service ne se bornait pas à conforter les bâtiments publics ; dotée d'un budget important, l'inspection devait, en priorité, assurer la sécurité des voiries urbaines. Sous l'effet des trépidations des charrois, des infiltrations des eaux de pluie et de la pression des immeubles en porte-à-faux sur les vides, rues et ruelles étaient devenues particulièrement vulnérables.

Entre 1777 et 1851, les premiers responsables de l'inspection des carrières, tous ingénieurs des Mines depuis Héricart de Thury, nommé en 1809, réalisèrent une oeuvre architecturale considérable que l'on peut assimiler à une véritable doublure de Paris.

6) GRANDS TRAVAUX

L'inspection s'attachait à repérer les vides de carrière et à en établir la carte. Elle aménagea plus de 300 kilomètres de galeries en sous-sol, principalement rive gauche, d'où avait été extraite la pierre à bâtir.

Le système consistait à établir sous chaque artère deux galeries parallèles dont les maçonneries extérieures se trouvaient à l'aplomb des fondations des immeubles. Un remblaiement entre les deux galeries assurait une consolidation parfaite sous chaque voirie. Ainsi établies, les conformations garantissaient les façades des immeubles et les effondrements ne pouvaient alors se produire qu'à l'opposé de la voirie, vers l'intérieur des parcelles. Les propriétaires avaient à leur charge toute la consolidation des parties restantes sous leurs bâtiments.

Les galeries épousaient des dimensions quasi normalisées d'une hauteur d'environ 2 mètres et d'une largeur permettant le passage d'un homme poussant une brouette pour accéder aux travaux en cours.

Un certain nombre de galeries constituant le réseau mis en place sont dites de recherche. Elles furent creusées dans la masse rocheuse, en suivant l'axe des voiries, pour rechercher les exploitations inconnues, sécuriser la voie publique et établir un réseau de circulation complet dans le Paris souterrain.

7) LA METHODE GUILLAUMOT

"L'inspection des plans m'avait fait connaître que les murs des édifices sur les anciennes fouilles de carrières portaient presque tous à faux sur le vide de ces fouilles ; le seul moyen de parer aux inconvénients qui pouvaient résulter de cette disposition était de prolonger les fondations des murs, depuis le ciel de la carrière jusque sur la masse du fond de cette carrière, avec des empattements suffisants, façonnés solidement à mortier de chaux et sable. Pour pouvoir en tout temps surveiller la conservation de ces constructions, il était nécessaire qu'elles fussent accessibles ; à l'effet de quoi il a été laissé sous et en dedans de la voie publique, une galerie de largeur suffisante pour le passage des matériaux de construction, à l'extrémité de laquelle il a été élevé un autre mur.

Des transversales ont été ménagées de distance Pour communiquer aux deux côtés des voies publiques et pouvoir passer de l'une à l'autre galerie. Les parties renfermées ainsi par quatre murs sont encore soutenues par une grande quantité de piliers à bras et le tout est ensuite bourré avec des terres et recoupes de moellons ; en sorte qu'à l'exception des galeries destinées à visiter en tous temps et à réparer les parties qui en auront besoin, tout le dessous des rues et voies publiques se trouve hermétiquement plein, de manière que jamais il ne peut plus s'y former

aucun enfoncements

(Charles Axel Guillaumot, *Mémoire sur les travaux ordonnés dans les carrières sous Paris*, 1797.)

II) LE NIVELLEMENT DE PARIS

Différents systèmes de nivellement furent mis en pratique et, parmi eux, deux réseaux furent affectés spécifiquement à Paris. Le premier, adopté par l'administration municipale au début du XIX^e siècle, était constitué par une ligne fictive au-dessus du sol. Des plaques en fontes placées dans la capitale indiquaient le positionnement de ces sondes par rapport à la fameuse ligne de référence. Plus le chiffre indiqué sur la plaque était important, plus le niveau était bas. Ce système fut progressivement abandonné au profit du nivellement du pont de la Tournelle.

Le niveau des plus basses eaux de l'été 1719 au Pont de la Tournelle fut considéré comme le point zéro à partir duquel les crues seraient mesurées : une échelle graduée fut placée à cet effet sur le mur de pierre du quai de Béthune. Le pont de la Tournelle était alors le premier pont en amont de Paris et l'échelle d'étiage permettait aux mariniers de savoir si la navigation leur était possible en fonction du tirant d'eau de leur bateau.

L'échelle du pont de la Tournelle servit également à l'établissement du nivellement de Paris. Dans la première moitié du XX^e siècle, on apposa à côté du nivellement du quai de Béthune une plaque précisant que la référence zéro de l'étiage correspondait à la cote de 25,62 mètres relevée à Marseille.

En période normale, l'étiage de la Tournelle oscille aux environs de 1,20 mètre grâce à la régularisation du niveau que permet le barrage de Suresnes. Lors de la grande crue de 1910 grimpa à 8,50 mètres ; grâce aux barrages-réservoirs de la Seine de la Marne et de l'Aube les crues de février 1994 et de janvier 1995 ne dépassèrent pas la cote de 5 mètres.

1) NIVELLEMENT EN SOUS-SOL

Le niveau moyen de la Méditerranée, fixé par le marégraphe totalisateur de Marseille, sert, depuis 1897, de repère d'altitude pour la France entière. Cette référence a été choisie en raison de la nécessité de disposer d'un repère fixe (ce qu'autorisait la faible amplitude des marées méditerranéennes) pour toutes les

opérations d'urbanisme de grande envergure. Sans ce témoin, il n'y aurait ni TGV ni tunnel sous la Manche, ni pont de Normandie, ni distribution d'eau potable, ni tout-à-l'égout...

Le nivellement le plus important a été réalisé entre 1855 et 1860 avec pour référent l'étiage du pont de la Tournelle. Ce système permettait de connaître avec précision le niveau des exploitations par rapport aux basses eaux de la Seine.

Le repère gravé était judicieusement complété par une cote d'altitude du recouvrement de la carrière. Ces travaux ont été réalisés lors de la constitution des plans de l'inspection des carrières (cartographie Fourcy-Delesse). Le départ de chaque série de nivellement s'effectuait, par commodité, au droit d'un puits de service. On affectait la lettre A au repère initial puis, par visée optique, on opérait le nivellement selon une suite chronologique alphabétique.

Certains puits à eau réalisés par Héricart de Thury à partir de 1815 furent aménagés avec une échelle d'étiage corrélée avec le nivellement du pont de la Tournelle, ce qui permettait aux hydrologues de suivre la mouvance de la nappe phréatique. L'ouvrage, édité en 1815, *Topographie et consolidations des carrières sous Paris*, destiné aux ingénieurs et urbanistes, situait deux cents nivellements indiquant chacun les niveaux du sol, du sous-sol et de la nappe phréatique. D'autres sites, non répertoriés, comme les carrières du Val-de-Grâce, furent nivelés uniquement par rapport à la Méditerranée. . . ce qui présentait un intérêt moindre.



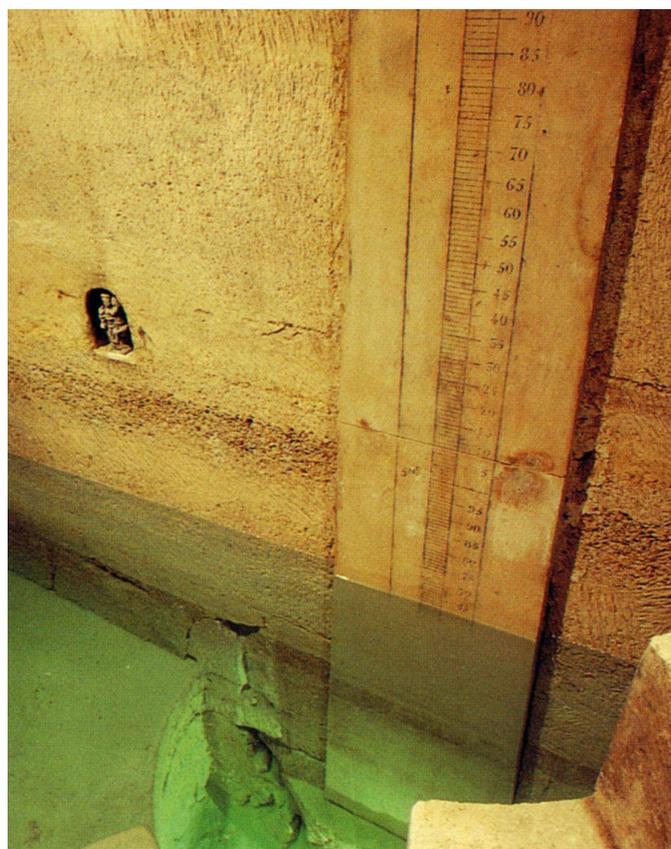
Relevés souterrains à Bagneux vers 1895

2) PARIS COULE-T-IL ?

Les grands travaux parisiens de la deuxième moitié du XX^e siècle nécessitèrent un assèchement de la nappe phréatique. A la fin de ces chantiers, au début des années quatre-vingt, l'eau a remonté inexorablement jusqu'en 1983 pour retrouver un niveau stable. Depuis cette date, la lecture de l'étiage des Capucins, originellement fixé à 3 mètres, ne varie que de quelques centimètres autour de 4,20 mètres (le niveau de la Seine au pont de la Tournelle, stabilisé par le barrage en aval, indique une cote régulière de 1,20 mètre).

Le 13 février 1988, l'échelle affichait une hauteur de 4,63 mètres, record absolu depuis les inondations de 1910 où la montée des eaux dans la carrière des Capucins fut de l'ordre de 4,78 mètres.

Les fluctuations de la nappe phréatique n'ont pas toujours été anticipées par les architectes au cours des dernières décennies et ont pu être la cause de quelques désordres dans les constructions souterraines, Certains niveaux inférieurs de parking d'immeubles, inondés depuis 1980 restent ainsi totalement inutilisables.



L'échelle d'étiage de la fontaine des Capucins

III) METHODES DE DETECTION DES VIDES

1) LES DONNEES CARTOGRAPHIQUES

Les cartes topographiques à grande échelle (1/10 000 à 1/50 000 mentionnent l'existence des exploitations souterraines sous la forme d'un figuré ou d'un signe spécial reproduit dans leur légende. Ce signe est porté à l'emplacement du lieu d'extraction, ce qui donne pour les cartes géologiques la nature du matériau exploité.

Parfois les puits de service des exploitations sont cartographiés. Ils peuvent aussi faire l'objet d'un signe spécial porté en légende.

Enfin, les carrières de type industriel ont parfois resservi après leur abandon à d'autres activités. C'est ainsi que les carrières de calcaires grossier sont souvent devenues des champignonnières auxquelles correspond un signe (en forme de champignon) mentionnant leur présence.

Ce sera surtout pour les exploitations de type artisanal que cet examen sera fructueux. Elles sont proches de la surface. Il n'est pas rare que leur présence s'y marque et ce, de plusieurs façons :

- **Dans la topographie :** ces exploitations, d'un soutènement précaire, se sont effondrées avec le temps, donnant en surface des dépressions très localisées de forme ovale ou circulaire, parfois transformées en mares ;
- **Dans la toponymie :** en milieu rural, l'exploitation a fourni un nom reflétant sa nature, au lieu d'extraction. C'est ainsi qu'abondent les lieux-dits : "La Marnière", "les tuileries" ou "Le Puits" ou encore "Le trou".

Ceci est particulièrement visible sur les cartes à grande échelle où les petits détails sont bien représentés. De même les noms de lieux-dits ou de parcelles agricoles y figurent qui sont les plus évocateurs. C'est pourquoi des recherches sur des plans cadastraux ou en archives sont souvent payantes. Ainsi de tels documents sont évidemment un guide précieux dans la recherche de ces cavités. On relève ainsi différents noms susceptibles de refléter l'existence d'exploitation artisanales :

- l'argillère
- les Marnières, les grandes marnières, la fosse des marnières
- le puits
- le trou d'... le trou au... (exemple : le trou d'Enfer)
- les glaises, le bols des glaises

- la Tuilerie
- le four à chaux (pour la craie)
- les plâtrières (pour le gypse)
- les sablonnières
- la mare
- etc.

certains d'entre eux sont ambigus et peu nets (la mare, le puits, etc.) mais leur répétition fréquente sur une carte est un indice qu'une enquête rapide sur le terrain permet ou non de confirmer (relations orales des gens, dépressions en surface, archives à la mairie, etc.). Il faut néanmoins se méfier du fait que bon nombre des exploitations ont eu lieu à ciel ouvert, surtout lorsque le recouvrement était faible. Ceci peut être décelé dans quelques cas par la présence de talus provenant des déblais de l'exploitation.

Le plus souvent, elles étaient souterraines dans les champs, et à ciel ouvert dans les bois (ce qui ne veut pas dire que toutes les exploitations situées dans les champs sont souterraines).

L'importance de la répercussion de ces exploitations sur la topographie peut permettre un recensement uniquement à partir des cartes topographiques au 1/20 000 et 1/50 000. Les marnières sont souvent signalées sur les cartes géologiques par un signe spécial ainsi que par la lettre correspondant à la formation exploitée.

Le document le plus élaboré répertoriant les exploitations industrielles est certainement "l'Atlas des carrières souterraines de Paris, des Hauts de Seine, Seine saint Denis et Val de Marne" sur lequel sont recensées dans le moindre détail toutes les carrières de ces régions, avec leurs différentes superpositions et leur situation précise par rapport à la surface. Ce travail a été élaboré au Service des Carrières de Versailles pour les départements de l'Essonne des Yvelines et du Val d'Oise.

2) LA PHOTO-INTERPRETATION

Elle utilise l'enregistrement global de la partie visible du spectre électromagnétique, correspondant à des longueurs d'ondes (λ) telles que : $0,4 \mu < \lambda < 0,75 \mu$.

Ces enregistrements se font sur des émulsions de différents types :

- **Panchromatique** : dont la sensibilité couvre la partie visible du spectre. Elle sert à tous les travaux d'interprétation planimétrique de photogrammétrie et de restitution métrique
- **Infrarouge noir et blanc** : dont la sensibilité déborde sur le proche infrarouge (de $0,57$ à $2,5 \mu$)

- **Couleur** : qui couvre le même domaine que l'émulsion panchromatique
- **Fausse couleur** : qui associe les avantages de la couleur au domaine de la sensibilité de l'infrarouge. Un glissement des couleurs permet la visualisation en rouge de la réflexion dans l'infrarouge. Pour ce faire, à l'enregistrement, on groupe sur deux couches sensibles (jaune et magenta) les radiations du spectre visible et l'on enregistre sur la couche cyan la et partie infrarouge du spectre (ces trois émulsions étant évidemment situées sur le même support). Ce type présente un intérêt particulier en hydrologie, pédologie et botanique.

3) LA TELEDETECTION

Elle se différencie de la photo-interprétation par :

- Une extension de la zone utilisable du spectre au-delà du visible (jusqu'à: 14μ)
- Une meilleure sélectivité spectrale des détecteurs
- Un enregistrement sur support numérique, visualisé dans un second temps.

Les détecteurs utilisés sont des radiomètres utilisant des éléments photosensibles centrés sur une bande spectrale. Ils peuvent être mono ou multicanaux, c'est à dire enregistrer à la fois une ou plusieurs bandes spectrales séparément, fixes (donnant alors un simple profil suivant le trajet de l'avion) ou à balayages (donnant alors une image). Les domaines spectraux couverts sont :

- Le visible de $0,3\mu$ (violet) à $0,75\mu$ (rouge)
- Le proche infrarouge $0,75$ à $2,5 \mu$, domaine où la végétation possède une forte réflectance.
- L'infrarouge moyen, limité aux fenêtres atmosphériques, aussi appelées fenêtres thermiques du sol, de $3,5\mu$ à $5,5\mu$ et de 8μ à 14μ
- Le champ de vue instantané est de 2 mrad, soit $2m$ à $1000m$ d'altitude. Leur résolution énergétique est de $0,25^\circ C$ c'est à dire qu'on peut détecter des variations thermiques de cet ordre.
- Les radiomètres micro-ondes : qui travaillent dans des ondes millimétriques et centimétriques. Nous n'en parlerons pas ici, leur pouvoir de résolution étant inférieur aux précédents. Ils ont l'avantage de ne pas être perturbés par les phénomènes atmosphériques (détecteurs tous temps).

Toutes ces méthodes étudient trois paramètres principaux qui déterminent le ou les détecteurs à utiliser :

- . la morphologie
- . la végétation
- . l'humidité des sols

Ces deux derniers étant fréquemment liés.

L'existence de cavités se traduira par des variations de ces paramètres. Pour la morphologie, ce seront surtout les cavités de subsurface qui se marqueront par des formes dépressionnaires locales : les dolines, les fontis, les marnières effondrées ou affaissées, les puits desservant des exploitations à partir de la surface. Ce relief négatif est fortement accentué par l'effet stéréoscopique, ce qui permet une détection facile des cas les plus marqués. La relation entre la position de l'anomalie et la forme du relief environnant d'une part, la nature géologique du sous-sol d'autre part, permettra de déceler les cas moins tranchés. Un simple examen stéréoscopique du pourtour de la butte témoin de Dammartin en Goële permet de détecter plusieurs dépressions qui semblent correspondre à des fontis engendrés par la dissolution du gypse ludien sous-jacent. Ce phénomène se retrouve sur la plupart des buttes témoin de la région parisienne.

L'hétérogénéité créée dans la nature du terrain de surface par une cavité sous-jacente entraînera une anomalie dans l'humidité de surface. Ce sera le cas des exploitations, des karsts remblayés. Une expérience a été réalisée aux Etats-Unis, avec scanner multispectral (radiomètre à plusieurs canaux), travaillant de 0,4 à 14 μ sur une région karstique située sous un recouvrement sableux d'une quinzaine de mètres. Ces cavités assuraient un drainage plus rapide des eaux superficielles situées à leur verticale ce qui déterminait une zone plus sèche localement. On a donc pensé que ceci aurait une répercussion sur la physiologie de la végétation et sur la température de radiance des sols. Effectivement, dans infrarouge thermique, (de 8 à 14 μ) les températures se sont échelonnées entre 25 et 30° C. La cartographie des différents niveaux de rayonnement a montré des anomalies centrées sur les dolines, le phénomène étant souligné par leur agencement circulaire. Le centre des anomalies correspondait à une température de 26,9° C qui augmentait progressivement jusqu'à 29,4° C à leur bordure. L'influence de l'humidité sur la végétation visualisée dans le proche infrarouge (1 à 2,6 μ) a confirmé cette disposition. Selon des experts cette méthode serait utilisable pour détecter les phénomènes situés à 30m de profondeur.

Un avantage de la photo aérienne est l'examen de la surface dans le temps à partir des couvertures multichronologiques. On examine alors sur les photos

successives la variation ou la persistance des anomalies dans le temps, à différentes saisons. Les anomalies persistantes étant les plus significatives, en particulier les taches ponctuelles d'humidité. Cependant les formes artificielles peuvent disparaître d'une couverture à l'autre de par l'activité humaine en surface. Une étude exemplaire à ce sujet est celle entreprise sur le site de Roissy en France pour l'édification de l'aéroport. Elle avait nécessité le regroupement d'archives cartographiques (cartes les plus anciennes de la région relevés cadastraux) et l'examen de 11 missions aériennes la plus ancienne datant de 1933.

"Cette étude à la fois morphologique et hydrologique de la surface topographique à différentes périodes avait permis de recouper les faits donnés par la cartographie, de suivre l'évolution des formes durant les années et surtout de révéler la présence de nombreux trous (marnières ou fontis) petit à petit comblés et actuellement complètement nivelés et invisibles à la surface du sol". Ce sont d'ailleurs les documents les plus anciens qui s'étaient révélés les plus riches en renseignements, sur la situation des exploitations (carrières et carrières dans le Saint Ouen), alors que les documents modernes, y compris une couverture de 1967 en fausse couleur, ne pouvaient que donner des présomptions d'exploitation à partir de zones d'humidité et des points plus foncés en surface.

De même, "des couvertures aériennes répétitives, en hiver sur sol nu, ont été utilisées pour la localisation de fontis dans des régions en voie d'aménagement du bassin de Paris"

Tous ces exemples concourent à démontrer l'utilité de ces méthodes dans la recherche de cavités. Ce sont surtout des méthodes rapides et peu chères qui permettent de dégrossir les problèmes et d'orienter les recherches au sol sur des zones sensibles repérées par leur persistance au cours des temps. D'où un gain de temps et une efficacité accrue de la recherche qui en font des outils de choix jusqu'ici trop méconnus, d'autant plus que les progrès récents étendent fortement leur champ d'application.

2) METHODES DE PROSPECTIONS GEOPHYSIQUES

Ces méthodes étudient à partir de mesures en surface différents paramètres physiques caractérisant le sous-sol. La présence d'une cavité modifiant ces derniers localement, sera décelée par l'enregistrement en surface de leurs variations.

Les méthodes utilisées sont :

- **La gravimétrie** : mesurant les variations de densité

- **L'électricité** : mesurant les variations de résistivité
- **La sismique** : mesurant divers paramètres relatifs au mode de propagation d'ondes
- **L'électromagnétisme** : mesurant les variations d'un champ électromagnétique (naturel ou provoqué)
- **Le magnétisme** : mesurant les variations d'un champ magnétique

A) GRAVIMETRIE

Cette méthode mesure les variations de la composante verticale du champ de gravité. Ces variations sont fonction de la répartition des densités du sous-sol. Une cavité, structure caractérisée par:

- un faible volume
- une profondeur réduite
- un contraste de densités relativement élevé créera à son voisinage une anomalie gravimétrique négative dont l'intensité sera fonction :
 - du rapport volume / profondeur : plus il sera grand, plus l'anomalie sera forte
 - du contraste de densités celui-ci peut varier en fonction de la nature des terrains encaissants ou du remplissage de la cavité (air, eau, remblais. etc.) Meilleur sera le contraste. plus grande sera l'anomalie.

En fait ce que l'on mesure c'est l'anomalie de Bouger. Si la terre était parfaitement homogène. cette anomalie serait nulle en tout point. Elle ne dépend donc que des hétérogénéités du sous-sol. On peut calculer (par intégration) la valeur en un point M de cette anomalie due à un contraste de densité pour un volume δv .

B) LES METHODES ELECTRIQUES

ces méthodes étudient :

- La répartition des résistivités des terrains (horizontalement ou verticalement)
- La répartition des lignes de courant et des lignes équipotentiels dans le terrain
- Les phénomènes naturels d'électro-filtration Pour ce faire, elles utilisent respectivement :

- les traînées de résistivité et les sondages électriques
- les cartes de potentiel, les mises à la masse
- la polarisation spontanée.

Une cavité, selon la nature de son remplissage (air, eau, argile, remblais) formera une hétérogénéité plus ou moins résistante qui se traduira dans des mesures par une variation dans les résistivités ou dans la répartition des lignes de courant. L'efficacité de la détection sera fonction de la valeur de l'anomalie engendrée, elle-même proportionnelle :

- A la taille et à la profondeur de la cavité
- Au niveau du bruit de fond, engendré par les hétérogénéités des premiers mètres du sol.
- Au contraste de résistivité entre la cavité et le terrain encaissant (fonction du remplissage et de la nature du terrain)
- Aux performances des dispositifs adoptés.

Beaucoup de facteurs sont ici mis en jeu qui en principe sont défavorables aux méthodes électriques. Notamment beaucoup de cavités sont dans des terrains résistants (calcaire grossier, gypse) ce qui diminue le contraste de résistivité. Les cavités à faible profondeur, situées dans les zones les plus altérées seront masquées par le bruit de fond. De plus les lignes de courant auront tendance à éviter une cavité résistante dans un terrain conducteur.

C) LES METHODES ELECTROMAGNETIQUES

Ce sont des méthodes de détection utilisant les propriétés de propagation de courants variables, contrairement aux méthodes électriques simples, travaillant en courant continu. On mesure à la fois un champ électrique E et un champ magnétique B dont les relations sont régies par les équations de Maxwell, ce qui rend complexe leur interprétation. Cependant on démontre que seul le paramètre de résistivité du sol intervient dans ces équations et on est ramené au cas précédent.

Une conséquence de l'emploi de courants variables est que la profondeur de pénétration de ces méthodes est fonction de la fréquence du courant.

D) LES METHODES SISMIQUES

L'existence d'une cavité dans le sous-sol aura une influence sur la propagation d'une onde sismique, influence se traduisant par :

- Une diffraction des ondes incidentes
- Une diminution des vitesses de propagation, entraînant des retards dans les temps de propagation
- Des atténuations anormales de ces ondes, etc.

phénomènes qui seront autant de points de départ pour les méthodes de détection.

E) METHODES MAGNETIQUES

La détection des cavités par méthode magnétique est une méthode indirecte. Les anomalies sont dues :

- A des différences de susceptibilité magnétique pour des cavités tapissées d'argile
- A la présence d'objets métalliques dans le cas de cavités artificielles (notamment les tombes en archéologie)
- A des constructions enfouies, ou des ouvrages dont le matériau présente un contraste de susceptibilité par rapport aux terrains encaissants (monuments anciens en archéologie)

Cette méthode n'est guère utilisée qu'en archéologie.

F) LES FORAGES

Ils peuvent être de 2 types destructifs ou carottés. Dans le premier cas on enregistrera au niveau des cavités ou des zones décompressées une chute d'outil ou un niveau d'avancement anormalement rapide, une baisse de pression ou perte totale d'eau. Ces sondages ont été utilisés sur autoroute A 15 pour reconnaître les zones altérées et les cavités karstiques et artificielles du gypse, à l'aide des types d'outils suivants :

- Sondage au tricone : on mesure le temps mis par l'outil pour avancer de 50 cm
- Sondages au marteau perforateur à air comprimé : on dispose alors de trois moyens de contrôle :
 - l'utilisation possible de la tarière à vis hélicoïdale qui indique des zones meubles
 - la vitesse d'avancement du taillant, toujours par tranches de 50 cm
 - le nombre de coups par minute en fonction de l'avancement

de l'outil.

Des mesures complémentaires au pression-mètre étaient effectuées dans les zones douteuses pour vérification.

Pour les sondages carottés on peut aussi mesurer la vitesse d'avancement de l'outil, mais on dispose également du pourcentage de récupération pour chaque passe de l'outil, ce qui permet de localiser les vides éventuels.

G) CONCLUSION

Souvent dans la région parisienne la prospection doit avoir lieu en zone urbaine. Le choix se portera sur la gravimétrie qui est la seule à pouvoir fonctionner dans ce cas limite, moyennant tout de même quelques précautions supplémentaires (correction des effets des conduites souterraines, des caves. travail de nuit ou le dimanche à cause des vibrations dues à la circulation etc.)

Dans le cas inverse aucune méthode ne prévaut sur une autre à priori, mais leur emploi et le choix qui y conduit doit être fonction de toutes les données inhérentes aux conditions particulières de chaque prospection.

Toute prospection est lancée sur la base de quelques indices et ce sont eux qui permettront le choix d'une méthode particulière ou de la combinaison de plusieurs d'entre elles ce qui est toujours meilleur. Chaque méthode a ses avantages propres :

- **La gravimétrie** est une méthode sûre mais dont l'emploi doit être soumis à un examen approfondi. Son inconvénient majeur est son prix de revient 30 € le point environ, topographie comprise). Ses limites sont bien connues théoriquement et elle fournit des renseignements quantitatifs sur les cavités.
- **Les méthodes électriques** sont d'une grande souplesse d'emploi mais d'une profondeur investigation assez limitée. Elles offrent des dispositifs de détection nombreux qu'il faut choisir toujours en fonction du problème à traiter. Le plus souvent ce seront les traînés de résistivité qui seront les plus adaptés. Leur inconvénient principal est leur grande sensibilité aux hétérogénéités superficielles et leur manque de données quantitatives. Elles serviront donc à dégrossir le problème de la localisation de cavités quitte à les coupler avec une autre méthode.

- **Les méthodes électromagnétiques** donnent aussi des renseignements uniquement qualitatifs. Elles tendent à devenir d'une mise en oeuvre très rapide pour un prix de revient minime. Elles offrent l'avantage de pouvoir modifier leur profondeur d'investigation en fonction de la fréquence utilisée.
- **Les méthodes sismiques** sont actuellement en pleine évolution. Elles partent de conceptions radicalement différentes pour réellement s'adapter à la détection de cavités. On peut en espérer beaucoup, mais d'un point de vue plus qualitatif que quantitatif. Elles ont l'inconvénient d'une mise en oeuvre moins aisée que les méthodes électriques.
- **Les méthodes magnétiques** ne peuvent répondre qu'à quelques cas bien précis ce qui limite beaucoup leur utilisation.
- **Les méthodes mécaniques** malgré un coût élevé, sont les seules méthodes réellement sûres. Leur mise en oeuvre est assez facile.

Le problème de toutes ces méthodes est l'adaptation à l'échelle ponctuelle que pose la détection des cavités. A l'heure actuelle certaines d'entre elles ont beaucoup progressé dans ce sens (c'est le cas de la gravimétrie) et dans l'amélioration de leur sensibilité (photos aériennes, télédétection, méthodes électriques et électromagnétique). D'autres sont encore en pleine évolution et on peut espérer des résultats dans un proche avenir (méthodes sismique).

IV) CONCLUSION

Paris et sa région, étant presque bâtis sur d'anciennes carrières, de ce fait il y a un risque permanent pour les bâtiments et les infrastructures. C'est pour cela que la stabilité de paris tient en une cartographie rigoureuse et un travail permanent de l'inspection général des carrières.

V) BIBLIOGRAPHIE

Charles-Alexandre Guillaumot,
Mémoire sur les travaux ordonnés dans les carrières de Paris, 1804,
56 pages

Louis Héricart de Thury,
Description des catacombes de Paris, 1815,
368 pages

Clément A. & Thomas G.
Atlas du Paris souterrain, 2001
200 pages

Lakshmanan J.
Cartographie micro gravimétrique et radioactive des zones de dissolution du gypse
du Lutécien au Nord-Est de Paris, 1973,
5 pages

Michel Lefebure de Fourcy,
Note sur les anciennes carrières sous Paris, 1854,

Du Mouza Jean
Thèse sur les cavités souterraines de la région parisienne, 1975,
275 pages

Havard M.
Localisation de cavités de dissolution par tirs sismiques en éventail, 1971,
Pages 31-33

Octave Keller,
La consolidation des anciennes carrières souterraines de Paris, 1895,

Dunkel J.T.
Topographie et consolidation des carrières sous Paris, 1885,
80 pages.

Le Service des Carrières de la Ville de Paris, L'Inspection générale des Carrières
de Paris