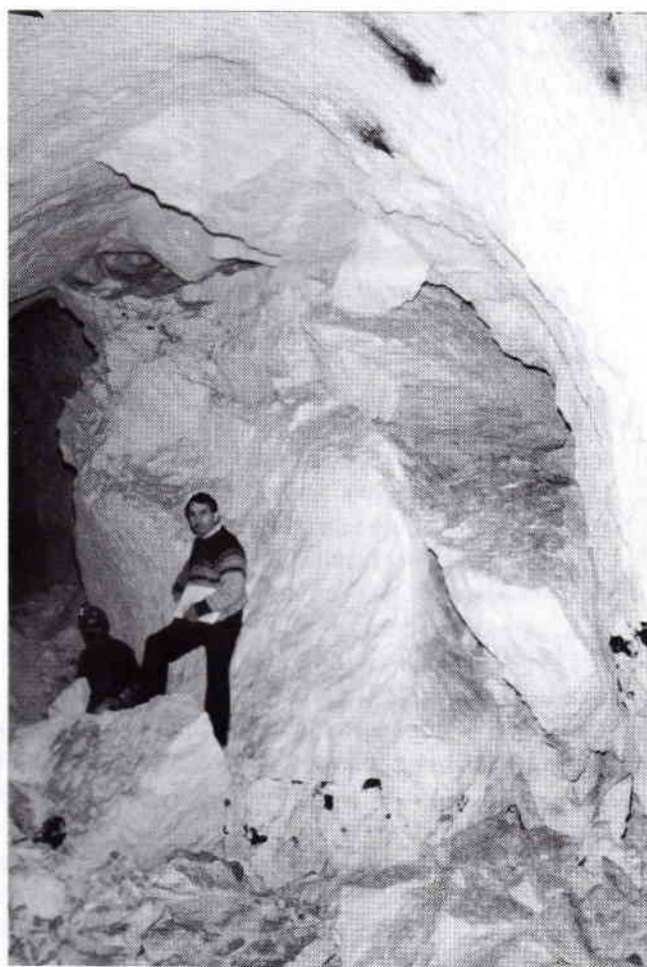


Comité de Sauvegarde des Sites de Meudon

Bulletin N° 112

2003 - N° 3



Les carrières de la Colline RODIN :

à gauche, une impressionnante perspective sur des croisées de voûtes accueillantes ;
à droite l'expert, Vincent MAURY, en reconnaissance, il y a une dizaine d'années, d'une carrière effondrée
située en limite de la pièce des Brillants, au nord du chemin de Saint-Cloud. (Clichés : Elie GOSSE)

SOMMAIRE

Avant-propos.....	p.3
Stabilité de la Colline RODIN et des carrières ARNAUDET.....	p.4
Nouvelles brèves.....	p.17

TAPISSERIE
SIÈGES
CADEAUX
STORES
PAPIERS PEINTS

"Bellevue Décoration"

Maison fondée en 1926

J. DESCOUT

RIDEAUX
LITERIE
LUMINAIRES
CANAPÉS
TENTURES MURALES

21, rue Marcel-Allégot, 92190 MEUDON - ☎ 01 45 34 11 78 - Fax 01 45 34 94 06



**Catherine
MUNOZ**

Agent Général

*Un Conseiller
à votre service*

ASSURANCES
CRÉDITS
PLACEMENTS

28 bis, rue de la République, 92190 MEUDON
☎ 01 45 34 16 13 - Fax 01 46 26 16 44

IMPRIMERIE
REPROGRAPHIE

TYPO-OFFSET
J'imprim

Réalisation de tous travaux

26, rue Drouet-Peupion
92240 MALAKOFF

☎ 01 47 36 21 41
Fax 01 47 36 21 94

E-mail : j.imprime@wanadoo.fr

l'artisanie

a quitté Meudon.

*Nous les remercions de leur fidélité
d'annonce dans ce Bulletin
pendant de nombreuses années.*



BULLETIN D'ADHÉSION

Mme, Mlle, M. _____

Adresse : _____

adresse, pour l'année en cours, au Comité de Sauvegarde des Sites de Meudon, 6, avenue Le Corbeiller, 92190 Meudon.

☐ un chèque bancaire

d'un montant de : _____ F

MEMBRE ACTIF 20 € MEMBRE BIENFAITEUR, À PARTIR DE 25 €

Date : _____

Signature : _____

La cotisation annuelle comporte le service du Bulletin (3 numéros par an)

Avant-propos

Le présent fascicule de notre Bulletin s'insère dans une série de quatre numéros délibérément consacrés à un patrimoine en lui-même très particulier, car il est en partie souterrain et, de surcroît spécifique de Meudon, puisqu'il s'agit des célèbres carrières que recèle le flanc Est de notre ville et du site de la colline qui surplombe celles-ci.

Nous avons souhaité, en effet, offrir à nos lecteurs, sur ce sujet, une information aussi complète que possible et qui, dépassant la simple description, soit nourrie de données scientifiques, historiques, sociologiques et pour finir futuristes, relatives à ce lieu désigné sous le nom de Colline de RODIN que lui vaut la dernière demeure du célèbre sculpteur. Dans cet esprit, le précédent fascicule en réunissant les numéros 110 et 111 de l'année 2003 était le premier d'une trilogie qui comportera l'actuel n°112 dernier numéro de l'année 2003 et le suivant, premier de l'année 2004 à paraître prochainement. Il avait pour objectif de replacer les carrières dans leur contexte géologique étendu au bassin parisien grâce en la matière à la compétence de Michel COLCHEN. L'article de celui-ci était accompagné par ceux de deux autres spécialistes, Daniel OBERT et Jean GAUDANT, qui ont apporté les compléments scientifiques propres aux carrières de Meudon et relatifs, respectivement aux traces laissées au fil du temps géologique sur les matériaux soumis à une dynamique interne, et à celles laissées sous la forme de fossiles par les organismes présents dans l'environnement qui fut celui où s'est élaborée la craie, l'un des matériaux exploités à Meudon.

Une fois dressées les données scientifiques relatives aux carrières, l'ambition du numéro 112 est de donner un aperçu synthétique des problèmes liés à la stabilité des carrières en général et, en particulier, de celles de Meudon. Grâce à la compétence et à l'expérience du signataire, Vincent MAURY, expert en mécanique des roches reconnu au plan international, l'objectif recherché est certainement atteint. Nous avons souhaité que cet article soit accompagné d'une étude historique très documentée conduite par Marie-Thérèse HERLEDAN il y a une quinzaine d'années, retraçant au cours du XIX^{ème} siècle, grâce aux dépouillements d'archives, les péripéties qui ont présidé à l'exploitation de la "pièce des Brillants" et les controverses consécutives au rôle joué par la circulation des eaux qui furent souvent portées devant l'autorité judiciaire. Par la densité du texte et des schémas, par son extension, l'ensemble dépassait le cadre de notre publication et, son auteur n'ayant pas accepté d'en donner une version allégée, nous nous bornons à souligner ici l'importance de cette étude et à rappeler que, portée en temps utile à la connaissance de l'autorité préfectorale, elle eut un impact décisif quant aux projets d'urbanisme envisagés sur la Colline RODIN¹.

Le Bulletin n°113 orienté sur l'avenir de ce site remarquable de notre ville fera place à l'imagination et à la créativité avec deux articles évoquant des possibilités de mise en valeur, à notre époque, du patrimoine que représentent à la fois la surface et le sous-sol de la Colline RODIN. Tandis que le premier signé Jacques PARINI dressera un inventaire quasi exhaustif des activités de diverses natures envisageables dans les carrières classées par décret du 7 mars 1986, le second signé Mathieu de SOYE est le fruit d'un travail de fin d'études d'architecture présenté avec succès en novembre 1999. L'imagination et le talent de ce jeune architecte transcendent l'utopie de son ambitieux projet et, nous l'espérons, feront rêver le lecteur en laissant grande ouverte la porte donnant accès à d'autres projets, soit d'inspiration plus classique, soit encore plus avant-gardistes mais très probablement, celui de Mathieu de SOYE, au moins dans ses principes essentiels, aura valeur de référence.

Paulette GAYRAL

N.B. : les lecteurs particulièrement intéressés par l'histoire des carrières pourront prendre connaissance du bulletin n°230 de la Société des Amis de Meudon consacré à ce sujet en janvier 2004.

¹ Ce dossier *in extenso* sera déposé à l'Inspection générale des carrières, aux Archives municipales de Meudon, au Centre de documentation du Musée d'Art et d'Histoire de Meudon, aux Archives départementales des Hauts-de-Seine et à la Direction départementale de l'Équipement des Hauts-de-Seine.

STABILITÉ DE LA COLLINE RODIN ET DES CARRIÈRES ARNAUDET

Introduction

A une époque où nous disposons de moyens de calculs numériques vertigineux, l'évaluation de la stabilité de la Carrière ARNAUDET¹ pourrait sembler ne plus poser aucun problème, leurs formes simples et leur accès aisé permettant mesures et observations. La nature échappe hélas souvent aux schémas simples ou compliqués que nous concevons pour en décrire les comportements. La stabilité des carrières de la Colline RODIN en est un exemple éloquent, qui incite à beaucoup de modestie.

Cette stabilité pose en effet des problèmes géotechniques très originaux et de façon paradoxale sous certains aspects. Ces carrières semblent et sont parfaitement stables, comme chacun peut le constater lors de visites. Des carrières voisines, en situations pourtant comparables, se sont effondrées comme en témoignent les archives fin XIX^{ème} et XX^{ème} siècles, causant des désordres dangereux en surface.

Pour analyser la stabilité de ces carrières et conclure aussi sûrement que possible, avant de les ouvrir au public par exemple, il a fallu revoir comment sont conçues et construites ces carrières souterraines², quels types d'instabilité on y a observés et hélas subis. Ayant été déjà confronté à des autopsies de ruptures "historiques", le travail exceptionnel de Marie-Thérèse HERLEDAN (réf. A) s'est avéré une source d'informations inappréciable. Les moindres détails d'apparence anecdotique constituent des guides sur des mécanismes d'effondrement toujours difficiles à identifier.

¹ Nous désignons ainsi l'ensemble des carrières classées dont l'entrée se situe 7 rue du Docteur Arnaudet, ancien "Chemin ou rue de Fleury".

² On réserve en français le nom de mines aux matériaux "concessibles" c'est-à-dire ceux dont l'exploitation est soumise à l'obtention d'une concession de l'Etat ; se trouvent dans cette catégorie tous les minerais métalliques, combustibles comme le charbon, le lignite, les hydrocarbures, le sel, par exemple. Le terme "carrières" est réservé aux matériaux non concessibles - calcaires, sables, argiles, gypse, craie, galets, blocs, etc. pour lesquels un simple permis d'exploitation est requis. La différence essentielle n'est pas dans le type d'exploitation - souterraine ou surface -, on peut avoir des "mines" en surface (découverte de Decazeville) et des carrières souterraines, comme celles de Meudon. Elle est dans le fait que le propriétaire de surface reste propriétaire du matériau non concessible, alors qu'il ne reste que l'exploitant (le "concessionnaire") des matériaux concessibles. Les deux types d'exploitation sont régis par des législations très différentes rassemblées dans le Code Minier. Pour résumer, si le matériau ne vaut pas grand chose ou rien, il est à vous. S'il vaut quelque chose, il est à l'Etat.

Par ailleurs, la craie se déforme sous contrainte de façon très particulière, c'est ce qu'on appelle son "comportement géomécanique", dont nous résumerons les caractères exceptionnels et les principaux effets.

Comme tout site géologique, mais ici plus qu'ailleurs, le versant de la "Pièce des Brillants" présente une structure particulière, avec son empilage de craie, argiles et marnes et calcaire grossier. Chacune de ces roches constituant une ressource pour la construction, des extractions de ces matériaux en surface puis par carrières souterraines y ont été faites. Celles-ci ont entraîné des désordres variés et des bouleversements du paysage jusqu'en surface. Au milieu de ceux-ci, gît un édifice souterrain d'architecture remarquable par sa stabilité et son esthétique, intimement liées par les lois de la mécanique et l'art de nos anciens mineurs.

L'intérêt architectural, esthétique, mais aussi géologique, paléontologique et "paléo-industriel" de cet édifice du XIX^{ème} siècle a conduit à son classement en 1986, grâce à la persévérance d'individualités et d'associations.

Les terrains de surface constituent un belvédère sur la Seine et Paris qui par ailleurs n'ont pas échappé à la convoitise de certains, pour des motivations différentes et peut-être pas toujours désintéressées. De nombreux projets de construction ont été échafaudés, proposés et abandonnés : ils nécessitaient des travaux importants de fondations difficiles à évaluer, des injections à effets à double tranchant sans offrir des garanties suffisantes pour la stabilité à long terme des ouvrages en surface et la préservation des galeries classées.

A plusieurs de ces occasions, il a fallu reprendre les études, en tenant compte des progrès accomplis dans l'évaluation de la stabilité de carrières et mines comparables. Dans les années 1980, l'exploitation de gisements pétroliers de Mer du Nord et d'autres constructions de galeries dans le Bassin Parisien confirmaient ce comportement mécanique exceptionnel de la craie. Des projets de construction remettaient en cause l'équilibre du versant et du sous-sol de la colline Rodin : il fallut finalement expliquer comment et pourquoi les carrières sont si stables. Certains de ces projets (Z.A.C. "Esplanades RODIN" notamment) sont apparus faire peser des risques extrêmement difficiles à évaluer sur cet ensemble très complexe.

Une étude détaillée, des mesures in situ, une inspection exhaustive des galeries par des spécialistes étaient nécessaires pour établir un diagnostic précis de stabilité à court et long terme. Sous l'impulsion des associations et à notre demande, cette étude a été confiée à des spécialistes des ex-Charbonnages de France, regroupés au sein de l'I.N.E.R.I.S. (Institut national de l'environnement industriel et des risques), qui comptent parmi les meilleurs experts mondiaux dans ce domaine. On se reportera pour plus ample information à cette étude (réf. B) à laquelle nous emprunterons de nombreux résultats, sans perdre de vue que cette étude a été faite dans l'optique d'une "cohabitation" avec un projet immobilier très lourd ensuite abandonné. Ce rapport comporte en outre une liste impressionnante des carrières de la région parisienne ayant été le siège de ruptures et d'effondrements.

Des travaux, recherches et analyses de cas vécus, historiques de problèmes d'instabilités de carrières, exécutés dans la conception d'ouvrages de stockages souterrains, nous avaient cependant permis de discerner les problèmes essentiels posés par la Carrière ARNAUDET. Ils avaient aussi permis de mieux comprendre le comportement de la craie, d'avertir les autorités des risques encourus (réf. C), ce qui a permis de déclencher et d'orienter l'étude détaillée de l'INERIS sur des points particuliers.

Nous nous référerons dans la suite aux travaux de géologie générale concernant le site, notamment ceux d'OBERT (réf. D et E), COLCHEN (réf. F), la position des carrières dans leur contexte géologique par LORENZ, GALOYER et GOSSE (réf. G), et plus particulièrement GELY, LORENZ et OBERT, article sur la tectonique en référence G.

1 - MINES ET CARRIÈRES SOUTERRAINES EN CHAMBRES ET PILIERS

De nombreuses roches sédimentaires se sont déposées en couches parallèles et sont demeurées pratiquement horizontales ou à faibles pendages³ : minerai de fer de Lorraine, de Normandie, du Canada (Terre-neuve), sel (Lorraine, Etats-Unis, etc.), calcaires pour ciments ou pierres à bâtir (un peu partout en France), craie, argiles, gypse, charbons, lignites, etc.

Lorsque le minerai ou le matériau n'est pas de grande valeur, l'exploitant préfère abandonner une partie de la couche pour soutenir le terrain sus-jacent en évitant les frais d'installation de "soutènement"⁴, sans avoir les inconvénients de "foudroyage"⁵. Mineurs et

carriers ont pris pour cela l'habitude de creuser des réseaux de galeries perpendiculaires et de hauteur égale à celle de la couche à exploiter. Ces galeries délimitent des "piliers" de minerai qui supportent la charge du toit surincombant. Toutes les variantes par rapport à ce schéma idéal, appelé "chambres et piliers" se rencontrent, mais un tel tracé régulier facilite mécanisation et enlèvement du minerai.

En vue de conversion d'anciennes mines en stockages souterrains, nous avons ainsi été amenés à expertiser des centaines de kilomètres de galeries, délimitant des vides gigantesques de plusieurs millions de mètres cubes au Canada et Etats-Unis.

Ces tracés des galeries très réguliers permettent d'évaluer jusqu'à quel point on peut aller dans l'enlèvement du minerai en augmentant la largeur des galeries, ce qui revient à diminuer celle des piliers, sans compromettre la stabilité de l'excavation à court, moyen et long terme. Autrefois, un bon mineur devait en effet enlever le maximum de minerai quitte à ce que la rupture survienne juste derrière lui. La loi de 1998 du Code minier tempère maintenant ceci pour prendre en compte les conséquences de telles instabilités sur l'environnement.

Comment dimensionne-t-on maintenant les galeries, en fait les piliers, puisqu'on cherche à avoir les galeries les plus grandes et les piliers les plus petits possibles ?

Sans rentrer dans un cours d'exploitation des mines, on devine que le poids du terrain⁶ qui, avant creusement des galeries, s'exerçait sur toute la couche va, après creusement de celles-ci, se concentrer dans les piliers de minerai ou matériau restant. Connaissant le poids des terrains sus-jacents, si l'on a enlevé par exemple 30% de minerai (on parle de taux de défruits τ de 30% en jargon minier), la contrainte moyenne dans le pilier ("stress" en anglais)⁷ sera augmentée de 42% [$1/(1-\tau)$]. Ce calcul, dit de l'"aire tributaire", donne un état de contrainte moyen dans le pilier, que l'on compare à ce qu'une éprouvette du même minerai peut supporter sous la presse au laboratoire (appelée sa résistance en compression simple).

minerai. L'avantage de cette méthode est de récupérer plus de minerai – tout éventuellement –, mais l'inconvénient est de faire remonter des effondrements du toit de la mine parfois jusqu'en surface, causant des problèmes hydrogéologiques et d'environnement (cas de la Lorraine).

⁶ Il faudrait parler également des contraintes horizontales qui existent dans le terrain, mais ceci dépasse le cadre de cet article.

⁷ En tolérant un peu de franglais passé dans le langage médical, on peut dire que les piliers, tels ceux de certaines équipes de rugby avant des matches franco-anglais, sont véritablement "stressés".

³ Angle de la ligne de pente de la couche avec l'horizontale.

⁴ Soutènement : ensemble de méthodes telles que renforcement par pose de boulons, installation de piliers de supports artificiels, bétonnages, destiné à assurer la tenue du terrain.

⁵ Technique minière qui consiste à faire effondrer le terrain volontairement et de façon contrôlée après récupération du

Cette méthode, simple, pratiquée depuis très longtemps, permet d'avoir une évaluation du degré de chargement moyen des piliers et de juger de leurs réserves de stabilité. On tente parfois de définir un "coefficient de sécurité" en faisant le rapport de cette contrainte moyenne par rapport à la résistance du minerai (ici la craie).

Si cette démarche est défendable, il ne faut pas oublier que l'édifice souterrain comporte aussi toute la partie sous-jacente, appelée "mur", et sus-jacente, appelée "toit". Des désordres, ruptures, altération, peuvent aussi y apparaître et compromettre la stabilité générale de l'édifice.

Il faut donc se garder d'assimiler un coefficient de sécurité défini pour les piliers avec un coefficient de sécurité global relatif à la stabilité d'ensemble de l'ouvrage souterrain. On a vu ainsi des carrières souterraines s'effondrer avec des piliers possédant un large coefficient de sécurité, pour la bonne raison que c'est le toit qui a "lâché"⁸.

Tout se complique donc un peu et même beaucoup, pour le plus grand plaisir des concepteurs d'ouvrages et mécaniciens des roches, parfois hélas, à la déconvenue des constructeurs et exploitants miniers.

2 - PRINCIPAUX TYPES D'INSTABILITÉS OBSERVÉES EN SOUTERRAIN

Une revue sommaire de quelques types d'instabilité qui affectent les travaux souterrains permet de mieux comprendre des aspects exceptionnels de la Carrière ARNAUDET et d'expliquer sa stabilité.

Pour faciliter le classement de ces instabilités, on peut distinguer **des ruptures localisées**, provoquée par une insuffisance de résistance du minerai⁹ par rapport aux contraintes induites en un point précis. Ces ruptures peuvent se propager, affecter progressivement et se généraliser sur de grandes zones d'exploitation. Provoquées par des mécanismes différents, on connaît par contre **des ruptures** affectant presque **simultanément** de grandes zones d'exploitation, appelés **effondrements généralisés ou spontanés**.

⁸ Cette remarque s'applique beaucoup plus généralement : un coefficient de sécurité s'applique à un mécanisme ou au fonctionnement d'une machine : il est inutile d'avoir un coefficient de sécurité de 3 sur les organes de direction d'une voiture, si le circuit de frein est endommagé et proche de la ruine.

⁹ Nous parlerons indifféremment de minerai ou de matériau, les calcaires, craies, gypses, argiles ne constituant à proprement parler des "minerais" mais des roches.

2.1.- Ruptures localisées

En **paroi de galeries isolées**, il arrive que la concentration de contraintes induites par le creusement soit excessive par rapport à la résistance du matériau. La rupture survient alors en périphérie de ces galeries (on parle de parement, toit, ou mur, mais c'est en parement et toit qu'elle s'observe le plus facilement (schéma 1a). On parle **d'écaillage en compression** bien qu'il s'agisse en fait de rupture en cisaillement. Ces ruptures apparaissent fréquemment en tunnels et mines à grande profondeur et peuvent concerner des roches très résistantes (cas du Mont-Blanc et nombreux autres tunnels alpins sous forte profondeur). La craie, beaucoup moins résistante, peut présenter des ruptures analogues en excavation à faible profondeur.

Lorsque les galeries sont très hautes par rapport à leur largeur (on les dit "élancées"), un autre mode de rupture apparaît, créant de vastes fentes verticales parallèles à la paroi (schéma 1b). On parle alors **d'écaillage en extension**. Les grandes dalles verticales ainsi créées sonnent "creux" au marteau d'abord, puis finissent par se détacher. Leur chute agrandit la largeur de la galerie et d'autres ruptures parallèles apparaissent, formant des dalles parallèles affectant la roche saine. Les carrières de craie de Louveciennes ont des formes ovoïdes de 8 à 10m de hauteur pour 4 à 5m de large ; elles montrent ainsi un écaillage produisant des "dalles" de 15 à 20cm d'épaisseur et plusieurs mètres de hauteur et largeur.

Le **"toit des galeries"** peut également poser problème : en toit de gisements sédimentaires, une couche résistante assure parfois à elle seule et sans soutènement la stabilité de la galerie dans le minerai (schéma 1c). Si l'on va trop loin dans le souci d'exploiter le minerai en élargissant trop la galerie, la dalle a une portée excessive et se rompt. Selon l'épaisseur des dalles au-dessus, la rupture peut progresser donnant une véritable "cloche".

Si les couches sous-jacentes sont de résistance insuffisantes, c'est le **"mur"** (schéma 1d) qui va poser problèmes. Le pilier de minerai va poinçonner dans la couche constituant le mur, qui se soulève et casse.

Lié aux deux modes précédents, les **concentrations de contraintes aux angles vifs** entre toit et pilier et toit et mur pourront initier, déclencher ou relayer les deux types de ruptures précédant dans le toit et le mur, ainsi que dans le pilier (schéma 1e). En très grandes galeries pour stockage souterrain (hauteur 15 à 22 ou 25m) ou usines souterraines hydroélectriques, on évite toujours ces angles vifs en prenant des voûtes à formes courbes, ou en faisant un "pan coupé", au toit et au mur (stockages de Lavéra).

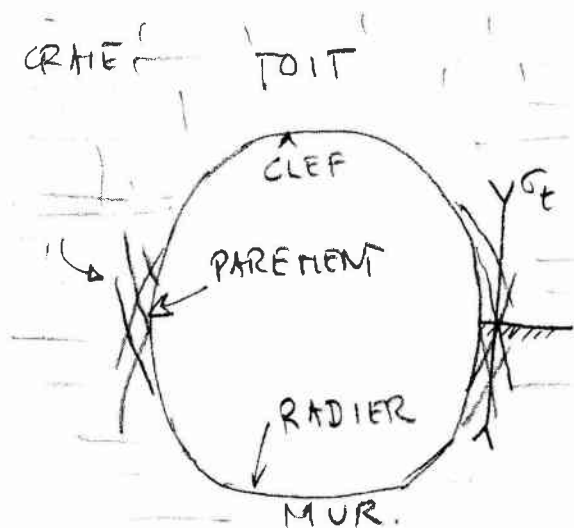


Schéma 1a : la contrainte en parement indiquée par la flèche est trop forte et produit un écaillage en cisaillement

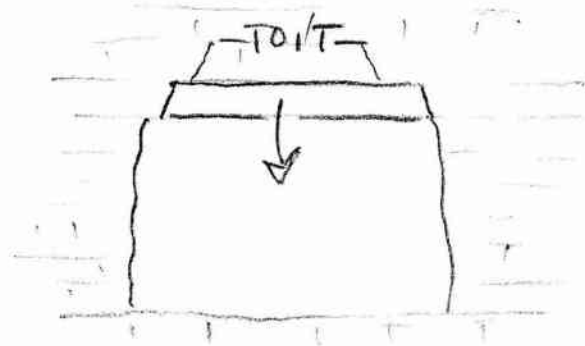


Schéma 1c : la portée de la dalle du toit est trop grande ; le toit (immédiat ou proche) casse.
Ex : carrière d'Auvers sur Oise

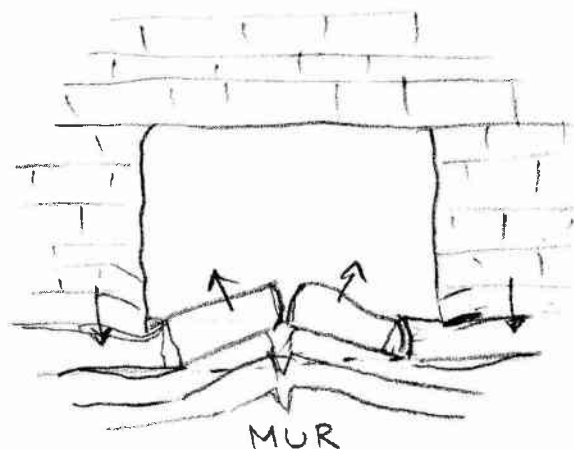


Schéma 1d : le mur est "poinçonné" par les piliers.
La "dalle" du mur se soulève.
Ex : mines de fer de Terre-Neuve

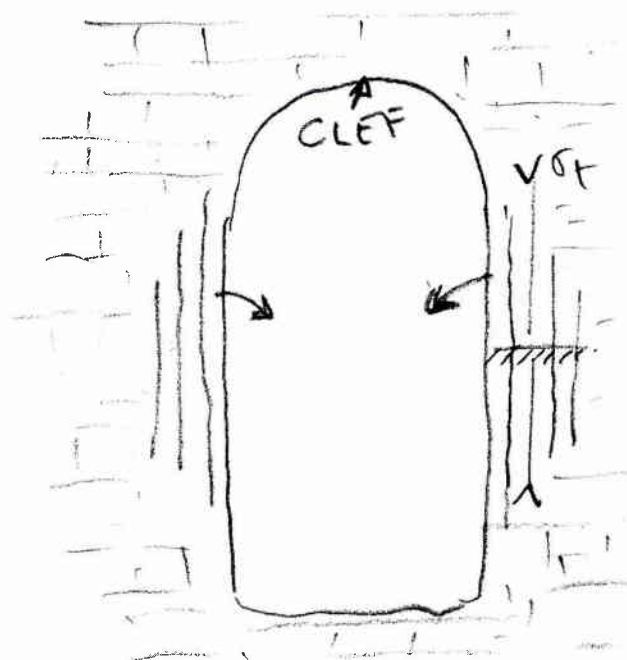


Schéma 1b : la contrainte est trop forte et produit un écaillage en extension (grandes dalles qui se détachent de la paroi)
Ex : carrières de Louveciennes

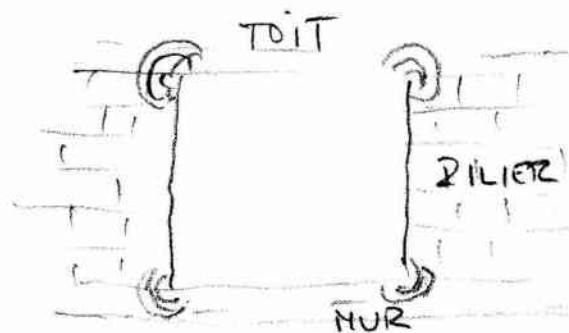


Schéma 1e : les concentrations de contraintes dans les angles vifs amorcent des ruptures dans le toit, les piliers ou le mur.



Schéma 2a : amorce de ruptures des piliers
(en extension ou cisaillement)
Ex : mines de sel de Louisiane

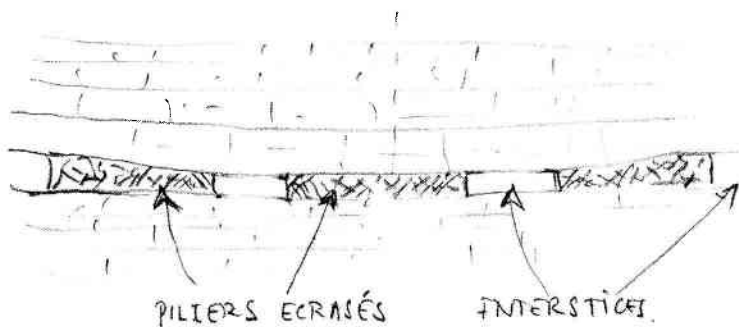


Schéma 2b : piliers complètement écrasés
interstice (60 - 80cm)
Ex : Carlsbad (Nouveau Mexique, U.S.A.)

Les piliers enfin ont à supporter tous les terrains sus-jacents et vont parfois montrer des signes de lassitude. Ceux-ci se traduiront par des **fentes dites en colonnettes** ou en **cisaillement** selon les roches. Les contraintes ne passent hélas pas aussi harmonieusement dans le pilier que ne le suppose la théorie de l'aire tributaire évoquée ci-dessus. Elles ont une fâcheuse tendance à se concentrer près du bord des piliers et à délimiter comme dans le schéma 1b pour les galeries isolées, de grandes plaques ou écailles verticales, qui se détachent de la paroi et diminuent de fait la largeur des piliers (schéma 2a). Dans certaines mines de sel de Louisiane, des piliers de 40m de hauteur et plus de 15m de largeur ont été faits. Il y apparaît des fentes parallèles très impressionnantes de 20 à 25m de hauteur et 15cm d'ouverture, délimitant des plaques de 1m d'épaisseur, fort dangereuses pour l'exploitation.

Comme on le voit, les modes de ruptures signalés ci-dessus concernent des zones très localisées. Telle une gangrène, ces ruptures se propagent si un profil inapproprié des galeries leur permet d'apparaître. En conséquence, ces instabilités, initialement localisées, se propagent progressivement et finissent par concerner de vastes zones.

Parfois aussi, délibérément, dans le souci d'extraire le maximum de minerai dont ils sont concessionnaires, les mineurs tolèrent la rupture après passage de l'exploitation. C'est la technique dite de "foudroyage", mentionnée précédemment, avec de nombreuses variantes.

Par exemple, les piliers sont parfois volontairement prévus trop petits pour assurer une stabilité à long terme, mais de façon à ce qu'à moyen terme ils s'écrasent complètement (schéma 2b, évolution du schéma 2a). Les mineurs dimensionnent alors les piliers de façon à disposer juste du temps nécessaire pour récupérer le minerai. Le toit descend progressivement jusqu'à se refermer complètement, écrasant complètement les piliers. Alors jeunes et malgré le manque d'enthousiasme de nos mineurs accompagnateurs, nous avons pu ramper dans les petits interstices de 60 à 80cm de hauteur entre piliers complètement écrasés des mines de potasse de Carlsbad au Nouveau-Mexique (Etats-Unis).

2.2.- Effondrements spontanés

Tout à fait différemment, certaines mines et carrières en chambres et piliers sont le siège de ruptures généralisées, affectant de vastes quartiers de mines, apparemment très stables, pratiquement simultanément. Ces effondrements, extrêmement brutaux, surviennent souvent sans aucun signe prémonitoire et sont de ce fait très meurtriers. On leur donne pour cette raison le nom d'"**effondrements généralisés spontanés**". Ils ont été étudiés initialement par TINCELIN (réf. H) pour les mines de fer de Lorraine où huit à dix de tels effondrements ont été responsables de plusieurs dizaines de victimes. De nombreuses études leur ont été ensuite consacrées par les spécialistes du CERCHAR et maintenant de l'INERIS.

Confronté à des observations de tels effondrements en vue de conversion d'anciennes mines pour des stockages souterrains, une revue de cas historiques fut entreprise dans les années 1970. Les observations de TINCELIN concernant les conditions de profondeur, dimensions géométriques, nature stratifiée du recouvrement, occurrence d'effondrements après des pics de pluviométrie se confirmèrent rapidement.

Plus surprenant fut de constater que ces effondrements étaient survenus non seulement dans le minerai de fer de Lorraine, mais dans des matériaux aussi divers et variés que pierre à bâtir dans le Périgord (calcaire de Chancelade, 1885), sel (mine de sel de Varangeville en Lorraine, 1873), calcaire à ciment (carrière de Champagnole, Jura, 1964), schistes argileux (galeries pour stockage souterrain de Lick Creek, Illinois, Etats-Unis, 1972), le triste record semblant détenu par les charbonnages de mines de Coal Brooks en Afrique du Sud en 1969 où 330 hectares s'effondrèrent

pratiquement simultanément, causant 431 victimes parmi les mineurs (réf. I). A ce type d'effondrements d'ailleurs, semble se rattacher celui de Clamart en 1961 qui fit 21 victimes, ce qui nous ramène un peu brutalement près de Meudon, un peu près à notre goût de la pièce des Brillants et des carrières ARNAUDET.

L'occurrence d'effondrements dans des matériaux de comportement mécanique aussi divers nous fit rechercher leur origine plutôt dans la structure du toit de ces carrières que dans le comportement du minerai. En fait, en bon "art des mines", les mineurs "respectent" la dalle du toit au maximum, (ils parlent de "toit immédiat"). Ils évitent en particulier tout endommagement par coups de mine intempestifs qui la casseraient ou la fissureraient et par boulonnage si ce n'est pas strictement nécessaire. Ces précautions donnent une dalle de toit en parfait état au point de vue mécanique, mais ces précautions vont se retourner traîtreusement contre les mineurs.

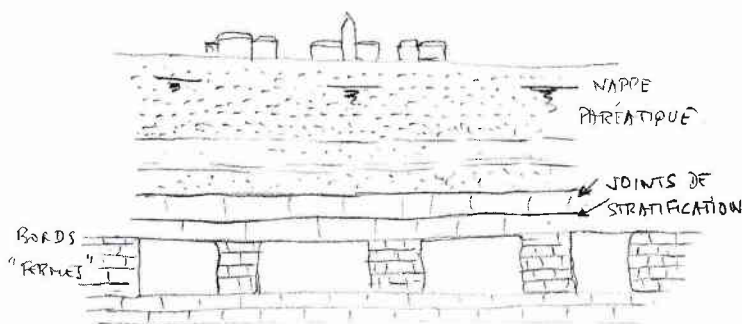


Schéma 3a

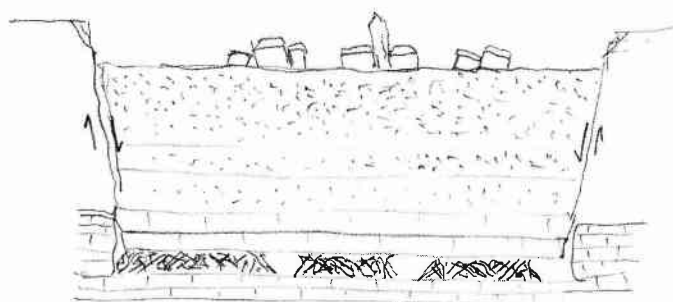


Schéma 3b

A l'échelle d'un panneau d'exploitation (disons 100m pour fixer les idées) (schéma 3a), la dalle, les dalles, du toit jouent à la manière d'un jeu de cartes. Mais à la différence des cartes très lisses d'un jeu en bon état, les joints rugueux entre les bancs horizontaux s'ouvrent légèrement et leur perméabilité qui facilite le passage horizontal de l'eau augmente très vite et énormément.

Dès lors, la pression de la nappe phréatique de surface vient s'exercer sur la dalle du toit. En dehors du fait que celle-ci n'est pas de taille à la supporter, son bon état mécanique, l'absence de fissures, fractures ou trous de boulons l'empêche de drainer cette eau sous pression et de faire tomber cette surpression. Le toit se met en charge hydrauliquement, simultanément sur de très grandes surfaces et la rupture généralisée de tout un quartier survient (schéma 3b). Ce mécanisme publié en 1979 (réf. I) a depuis été confirmé par des mesures en place et de nombreuses autres observations (réf. J).

2.3.- Différence avec les ruptures de surface : glissement de terrains

Pour en terminer avec les modes d'instabilités qui ont affecté la zone de la pièce des Brillants, il faut enfin mentionner les bons vieux glissements de terrain de surface en versant. On peut dire "vieux" puisque le dernier a été constaté en 1858 et a affecté les argiles sparnaciennes du versant. On verra que ces "bons vieux" glissements de versants, ne sont pas si bons que cela et qu'il conviendrait de ne pas les voir se rajeunir, ni recréer inconsidérément des conditions propices au réveil de leurs mauvais penchants.

3 - COMPORTEMENT MÉCANIQUE PARTICULIER DE LA CRAIE

La craie constitue, à première vue et à l'échelle macroscopique, un matériau idéal vérifiant toutes les hypothèses d'homogénéité, d'isotropie (propriétés identiques dans toutes les directions) alors que pour d'autres roches un mécanicien des roches est souvent plus réticent. Cette apparence fort trompeuse cache un comportement beaucoup plus complexe, réservant parfois des réactions meilleures qu'espérées, mais aussi des modes d'instabilités très surprenants et difficiles à prévoir.

Constituée d'agrégats de débris d'algues, les coccolithes, (voir réf. D), la craie montre d'abord une extrême sensibilité à l'eau, exceptionnelle parmi les roches (réf. K) (on trouvera dans la thèse Moiriat (réf. L) une bibliographie très complète de travaux exécutés dans la craie par divers organismes, CEBTP, LREP, bureaux d'études). Cette sensibilité nous est familière depuis le lycée, où l'abandon de la craie sur une éponge humide se voyait sanctionné par l'indignation du professeur,

déjà bien au courant du phénomène. Elle devait se confirmer à plusieurs reprises, dans des projets de stockage souterrain (réf. M), et dans l'enfoncement de 8 m de plate-formes pétrolières en Mer du Nord (réf. N). Des échantillons de craie ont d'ailleurs été prélevés dans la Carrière ARNAUDET par l'Institut Français du Pétrole, à fins d'études du réservoir d'Ekofisk, constitué de craie identique¹⁰

La craie dite "sèche"¹¹, a perdu son eau libre par séchage. Mais il reste encore de l'eau dite "liée" qui constitue un film et des ponts d'eau capillaire entre les coccolithes. De nombreuses études faites au Museum d'Histoire naturelle et aux Laboratoires des Ponts et Chaussées ont montré que dans les craies typiques, l'essentiel des liaisons entre coccolithes était assuré par ces ponts d'eau capillaire (de la taille ou en-dessous de celle des coccolithes, c'est-à-dire le micron). Il n'existe en effet que très peu de ponts solides entre coccolithes.

Plus les ponts d'eau sont petits, plus les forces capillaires sont grandes, ce sont elles qui assurent la résistance de la roche. On a parfois évoqué la notion de "corset capillaire" qui maintient l'assemblage entre les grains. Dès que la teneur en eau augmente, même légèrement, les forces capillaires entre grains diminuent énormément et toutes les propriétés mécaniques s'effondrent, divisées par des facteurs de 2, voire 3 ou 5 dans les cas extrêmes, cas unique parmi les roches¹² (voir le célèbre nomogramme de Masson, réf. K).

En fait, un tel mode de cohésion nous est familier depuis notre enfance. Très jeunes, nous avons appris qu'il faut une teneur en eau bien dosée pour faire tenir un pâte de sable, que c'est impossible avec du sable sec et, qu'avec une teneur en eau trop forte, le pâte ou le château s'effondrent, ayant perdu toute résistance. La taille millimétrique des grains de sable correspond à des forces capillaires faibles, n'assurant qu'une très modeste résistance au pâte de sable. Par contre, les tout petits ponts d'eau entre coccolithes micrométriques induisent des forces capillaires bien plus grandes; ils donnent une bonne résistance à la craie mais le processus physique est le même.

¹⁰ Certains regretteront déjà que la craie de Meudon ne soit pas saturée de pétrole, mais l'environnement meudonnais en eût été bien modifié !

¹¹ En fait séchée dans des conditions normalisées très précises, 24 heures à l'étuve à 105°C.

¹² Des cristallisations secondaires ou dépôts d'autres minéraux vont pouvoir créer de véritables ponts solides entre coccolithes et on passera progressivement vers des craies dites "impures" ou non typiques, appelées selon les minéraux craies argileuses, glauconieuses, etc. . Avec du carbonate de calcium secondaire, on passera progressivement vers des calcaires crayeux, puis de véritables calcaires. Ce qui suit concerne les craies pures véritables, constituées de plus de 98 à 99% de CO₃Ca.

Cette craie "sèche" (attention toutefois à ne pas pousser le séchage trop loin, sinon les ponts d'eau vont à leur tour disparaître et on aura une farine de coccolithes !) présente donc un comportement mécanique d'allure très classique, appelé "élastique-fragile" ; "élastique" implique en mécanique que les déformations sous contraintes sont réversibles et "fragile" ce qui ne veut pas dire faible, mais qui présente une rupture brutale par fracturation.

Dès que la teneur en eau augmente, le corset capillaire s'affaiblit et notre **craie, maintenant partiellement saturée**, change sournoisement de comportement : d'abord toutes ses propriétés mécaniques, résistance, déformabilité, diminuent (divisées par 3 environ dans le cas de la craie campanienne de la zone des Brillants). De plus elle montre moins facilement de ruptures par fracturation, mais se déforme de façon continue et irréversible un peu comme une argile : on parle alors de déformation plastique et de comportement "élasto-plastique", puisqu'il persiste toujours une petite phase élastique, entendre déformations réversibles, en début de chargement.

A l'échelle microscopique, on a parfois dit que la structure de la craie était en "château de cartes", la liaison entre les cartes étant assurée par les ponts d'eau capillaires (pour être plus réaliste, les "cartes" sont constituées par les coccolithes qui sont plutôt de petits parallépipèdes !). Cette façon de voir explique d'autres caractéristiques de la craie, en particulier son effondrement sous vibrations, un peu à la façon d'un gel instable.

Nous voici donc en face d'un matériau d'une assez grande duplicité, montrant un comportement relativement franc à sec, mais en fait dû à un mode de liaison très original entre grains, plutôt de nature analogue à celles du pâte de sable. En présence d'eau, on assiste à une transition rapide vers un comportement très versatile, oscillant entre ruptures franches et adaptations plastiques, selon les états de contraintes, vitesse de chargements, température. Pratiquement, on verra apparaître de grandes surfaces de ruptures (carrières de Louveciennes), mais aussi la craie résister de façon provocante à des concentrations de contraintes théoriquement insupportables, probablement au moyen d'adaptations plastiques à l'échelle micrométrique et indécélables (stockage du Vexin, réf. J).

Un tel comportement ouvre la voie à toutes les surprises, bonnes et mauvaises, en construction d'ouvrage souterrain. Devant un superbe profil de galerie juste achevé, un de nos chefs de chantier résumait admirablement la situation, déclarant qu'"il aurait préféré comprendre pourquoi ces galeries étaient stables, plutôt que de ne pas comprendre pourquoi elles ne se cassaient pas la g...."

4 - STRUCTURE GÉOTECHNIQUE DE LA COLLINE RODIN

4.1.- Principaux facteurs géologiques importants pour la stabilité

On se rapportera à la description du Site géologique et à la localisation des carrières donnée LORENZ, GALOYER, GOSSE, GELY et OBERT (réf. D, E, G). Le cadre géologique de la Colline Rodin a été décrit par COLCHEN (réf. F). On peut souligner quelques éléments géologiques, importants pour la stabilité du site, même s'ils sont peu apparents.

Dans le haut de la colline, le **calcaire grossier** et les excavations qui y ont été faites, assez irrégulières et de peu d'étendue, ne présentent pas de risques, mis à part de petits effondrements locaux remontant en surface sous forme de petits fontis locaux, bien sûr peu plaisants lorsqu'ils surviennent dans votre jardin. Ces excavations ont certainement pour effet de rabattre la nappe phréatique supérieure du calcaire grossier, en limitant de façon favorable sa hauteur. Ceci est toutefois impossible à évaluer, tant le tracé des travaux est fantaisiste (encore faut-il que ces travaux sont connus et répertoriés !) et les conditions d'évacuation de cette nappe inconnue.

La **couche d'argiles plastiques sparnaciennes**, de faibles qualités mécaniques, a un rôle fondamental d'écran hydraulique, isolant la nappe supérieure "perchée" de la craie campanienne sous-jacente. Cet écran et son intégrité sont particulièrement importants : ils évitent aux carrières d'être soumises à des écoulements d'eau actifs, toujours responsables de désordres à terme, que ce soit par dissolution, érosion ou mise en pression intempestives. L'analyse de l'effondrement du 25 Juillet 1868 dans la carrière des Montalets, produisant un fontis de 17m de long et 50m de profondeur, rapporté par Marie-Thérèse HERLEDAN (réf. A), en est probablement une illustration. La liaison avec les fontis survenus 15 jours plus tard (10 Août 1868) est plus incertaine, mais la présence d'eau abondante montre que celle-ci a joué un rôle actif dans la création de ces fontis.

Un écran argileux analogue protège des carrières de gypse ludien situées un peu plus haut stratigraphiquement dans le voisinage à Clamart.

La **craie elle-même** est parcourue par un couloir¹³ de failles verticales d'orientation N125E au Nord et une faille parallèle au Sud (voir figure 3 page 40 de GELY, LORENZ et OBERT réf. G). A ces failles, on

peut rattacher un réseau de diaclases parallèles (cassures sans cisaillement), parallèles également à l'anticlinal de Meudon. Il existe en outre un réseau de diaclases à peu près verticales, de direction NS et un autre de direction N.NE.-S.SW. dont l'origine pourrait être liée à un épisode tectonique antérieur, telle la compression NS responsable de la formation de l'anticlinal de Meudon.

La craie est enfin parcourue par un réseau de diaclases de direction N20 à N30E à pendage faible à moyen (20 à 40°) NW. Ces diaclases appelées "laminaires" (l'origine de cette dénomination reste inconnue pour nous), ou de versant ou fentes en cuillères montrent des rejeux en cisaillement centimétriques et sont certainement liées à la formation de ce versant. Elles sont de plus en plus abondantes en s'approchant de la surface du versant d'ailleurs. Elles jouent un rôle fondamental dans la stabilité d'ensemble du versant, point sur lequel on reviendra ultérieurement (cf paragraphe 5.3).

On note un pendage général faible de toutes ces formations vers la Seine.

Dans ces réseaux de diaclases, fissures, failles, un réseau karstique (réseau de dissolution de la craie) très important s'est développé sous l'effet des ennoyages et émergences successives du massif de craie. En pratique, ces réseaux karstiques sont un poison intégral en construction d'ouvrages souterrains. Ces réseaux suivent d'abord plus ou moins la logique de la fracturation existante, avant de faire preuve de la fantaisie la plus débridée, au hasard des écoulements, bouchages par des poches argileuses. Il arrive d'observer une fissure millimétrique en paroi, d'apparence tout à fait anodine, qui se prolonge à l'intérieur de la masse de craie par un élargissement jusqu'à 1m ou plus, plus ou moins bourré d'argiles résiduelles dont le "débouillage" est impossible à prévoir (visible dans les carrières ARNAUDET). Ces karsts sont responsables de nombreux accidents en travaux souterrains.

Le toit de la craie montre une craie indurée, probablement en état de transition vers un calcaire crayeux, à comportement mécanique différent de la craie pure située en dessous.

4.2.- L'importance du réseau hydrogéologique

Il n'est pas inutile d'insister ici sur le rôle primordial du réseau hydrogéologique dans la stabilité d'ensemble du versant et des carrières. L'histoire de la pièce des Brillants est d'ailleurs émaillée d'incidents à propos de l'exploitation de l'eau, son stockage, son utilisation, etc.

¹³ On désigne ainsi un groupement ou une concentration de failles parallèles sur quelques mètres ou décamètres de largeur.

Non évacuée, la nappe phréatique supérieure peut se mettre en charge, provoquer des ruptures de toit localisées, voire aboutir à des effondrements généralisés sur de grandes étendues par mise en charge hydraulique. Elle peut être très efficace pour faire glisser le banc d'argile, surtout si celui-ci est exploité sans précautions.

S'infiltrant à la faveur d'une détérioration du banc d'argiles sparnaciennes faisant écran, elle peut causer des dégâts par dissolution, érosion et réactivation du réseau karstique dans la craie. Si les conditions de drainage sont modifiées, les diaclases (diaclasses laminaires en particulier) peuvent se mettre en charge et provoquer ou stimuler un glissement de versant. L'évolution de tels glissements peut être très rapide et catastrophique dans ce cas.

La meilleure solution est bien évidemment de laisser un écran d'argile bien continu, pas trop épais, et d'évacuer le plus loin possible les eaux de ruissellement et d'infiltration à travers le calcaire grossier.

L'évaluation de la stabilité des carrières et celle du versant, intimement liées, sont donc indissociables de celle du réseau hydrogéologique et d'éventuelles perturbations ou modifications de ce réseau dans le temps, notamment par des projets de construction et autres travaux.

5 - STABILITÉ DES CARRIÈRES ARNAUDET ET INSTABILITÉ ANCIENNE D'AUTRES CARRIÈRES

On peut maintenant examiner comment et pourquoi la Carrière Arnaudet présente une stabilité remarquable et pourquoi les carrières voisines de la pièce des Brillants (coté Chemin de Saint Cloud cf. photo de couverture) ou des Montalets ont montré des instabilités et effondrements que l'on peut tenter d'expliquer. On terminera par l'examen des conditions de stabilité du versant dans son ensemble.

Il ne s'agit bien sûr ici que d'une évaluation qualitative. On trouvera dans JOSIEN et TRITSCH (rapport de l'INERIS réf. B) toute les données quantitatives en termes de résistances et évaluation par modèles numériques).

5.1.- Stabilité de la Carrière ARNAUDET

5.1.1.- Stabilité générale

Si la stabilité générale de la Carrière ARNAUDET paraît évidente depuis plus d'un siècle, il est intéressant d'essayer d'estimer l'importance du chargement actuel et tenter d'évaluer les réserves de sécurité qu'elle possède. Là encore, le comportement particulier de la craie va troubler les conclusions et, sans doute, nous alarmer pour rien.

Comme traditionnellement et surtout dans une excavation de tracé aussi régulier que celui ces galeries ARNAUDET, on essaye d'évaluer le taux de chargement des piliers et de le comparer à la charge limite que la craie peut supporter sur échantillons. C'est ce qui a été fait avec beaucoup de soins et de sens critique par l'INERIS dans leur étude. On résumera ici les conclusions des modèles, puis ceux plus élaborés faits par l'INERIS (modèles numériques par éléments finis). Le tracé très régulier des galeries a même permis des études de comportement dynamique encore plus poussées faites aux Etats-Unis pour évaluer le rôle de secousses sur la conductivité hydraulique de joints et diaclases (réf. O).

Au laboratoire, sur de petits échantillons, la craie campanienne saturée d'eau peut supporter des chargements de l'ordre de 2,5 MPa (25 bars ou #25 kg/cm² de l'ancien temps). On se limite normalement à des chargements plus faibles, de l'ordre de 1,8 MPa, correspondant à la limite des déformations élastiques pures. Le calcul de l'aire tributaire rappelé paragraphe 1. donne un taux de chargement moyen des piliers aux environs de 1,8 à 2,2 MPa, voisin donc de la résistance de la craie, ce que confirme des mesures de contraintes en place effectués dans ces piliers. On aurait donc des piliers chargés au voisinage de leur résistance, avec un coefficient de sécurité relativement faible.

Dans les années 70, on considérait que des matériaux comme la craie ne pouvaient supporter à long terme que 50% environ de leur résistance. La Carrière ARNAUDET nous donne donc un démenti de cette "règle du pouce" des années 70 sur le comportement de la craie par une excellente tenue sur plus de 100 ans.

Un autre démenti cinglant nous a été donné dans les mêmes années par la réalisation des galeries de stockage de Gargenville (photo ci-contre) dans la craie Turonienne, "grande sœur" en résistance de la craie campanienne, mais de comportement similaire. Des galeries circulaires et ovoïdes ont montré une parfaite tenue sur plusieurs années, alors que les mesures montraient que la craie travaillait à sa limite théorique de "résistance".

A qui alors se fier ? ou plutôt de qui se défier ? En fait, les conditions d'essais au laboratoire correspondent à des états de contraintes qui essaient de ressembler à la nature mais en différent tout de même¹⁴. Nous pensons que des adaptations "microplastiques" se font dans la craie

¹⁴ Les essais de laboratoire correspondent à des états de contrainte "homogène" (en principe identiques dans tout l'échantillon), alors que l'état de contrainte varie lorsqu'on s'éloigne du parement d'une galerie. Nous abrègerons ici une discussion très délicate sur l'aptitude de certaines notions classiques de mécanique des roches à représenter le véritable critère de résistance de la craie et matériaux analogues, en dehors du cadre d'un tel article.

par glissement micrométriques de coccolithes et que cette adaptation permet des reports de contraintes classiques en plasticité, mais extrêmement difficiles à mettre en évidence malgré toutes les tentatives faites à Gargenville.

En pratique, ce ne sont donc hélas pas les "théories" éprouvées pour d'autres matériaux et censées représenter le comportement de la craie qui ont raison, mais ces théories ne sont pas adaptées au comportement de la craie.



Galeries de stockage de propane liquide de Gargenville dans la craie turonienne. Les galeries font 8,6m de hauteur et 6,4m de largeur. Le profil ovoïde des galeries a été retenu de façon à obtenir une distribution de contraintes et de stabilité optimales, dans l'optique du projet initial de stockage (fuel lourd en température).

Le liseré noir près de la clef de voûte n'est pas une rupture mais un joint de silex.

(Avec nos remerciements aux Sociétés Géostock et Géovexin)

5.1.2.- Stabilité locale

On peut maintenant examiner comment les carrières se comportent par rapport aux mécanismes

d'instabilités locales rappelées (paragraphe 2). Une fois de plus, on trouvera dans JOSIEN et TRITSCH (réf. B) l'analyse détaillée de tout ce qui est résumé ici, en termes plus accessibles pour les non spécialistes. La carrière a été découpée en zones, des évaluations de contraintes moyennes dans les piliers ont été faites, complétées par des modèles numériques plus élaborés. Des mesures de contraintes ont remarquablement confirmé les estimations théoriques. Nous renvoyons au rapport de l'INERIS (réf. B) pour le détail de toutes ces mesures et observations, résumées sommairement ici.

La forme parfaitement circulaire des voûtes est celle qui permet la meilleure répartition des contraintes dans le toit. Comme elle a été parfaitement respectée même pour les intersections, tous les mécanismes d'écaillage en toit (schéma 1a), de rupture de "dalle du toit" (schéma 1c), de rupture en angles avec le toit (schéma 1e), ont été éliminés et 100 ans d'observations des piliers nous montrent que les mécanisme du type (schéma 2a) n'ont pas apparu. On n'observe que des instabilités très locales, le plus souvent à la faveur de fractures pré-existantes.

Par ailleurs, les exploitants ont eu la sagesse de limiter la hauteur des galeries et piliers, ce qui fait que l'écaillage des piliers (schéma 2b) type Louveciennes pouvant conduire à un schéma 2a n'a pas pu se mettre en place.

Reste maintenant le raccord à angle droit avec le "mur" (schéma 1e) qui n'est pas très favorable. Il est pratiquement impossible de dire si cet angle a été le siège d'amorce de fissuration, car il est entièrement masqué par des matériaux de remblayage déposés par les divers exploitants (champignonnistes, fabricants de V2 pendant la guerre notamment). Si toutefois elle existe, cette fissuration ne semble pas avoir compromis la stabilité des piliers ni celle du mur.

En résumé, la forme parfaite des voûtes, les dimensions "raisonnables" retenues pour les hauteurs et largeurs des galeries ont éliminé pratiquement toutes les initiations de mécanismes locaux, alors que la craie, déjouant les règles de l'art ou plutôt du ponce, montraient des piliers étonnamment stables, à long terme.

Enfin, un respect poussé des superpositions de piliers les uns par rapport aux autres sur les 3 ou 4 étages que comporte la carrière, avec réduction progressive des dimensions en s'approfondissant, a permis des reports de contraintes très favorables et une stabilité globale sur la quasi-totalité de la carrière. Quelques désordres locaux non évolutifs ont cependant été notés dans les étages profonds où ces précautions n'avaient été qu'approximativement respectées.

5.1.3.- Stabilité par rapport aux effondrements généralisés

La forme de voûte circulaire a permis d'éviter une configuration du toit en forme de dalle. Elles ont ainsi coupé dans l'œuf la mise en place du mécanisme d'effondrement spontané d'origine hydraulique. Il est par ailleurs certain que les galeries supérieures dans le calcaire grossier et l'exploitation d'une partie des argiles sparnaciennes ont contribué à diminuer l'importance du chargement mécanique mais surtout hydraulique.

Il n'en reste pas moins que l'isolement hydraulique des galeries par rapport à la nappe de surface et l'évacuation des eaux de celle-ci est une condition impérative à respecter pour éviter des désordres locaux dus aux infiltrations qui pourraient s'étendre dans les galeries. Mais l'ensemble de ces éléments nous fait considérer comme tout à fait improbable la mise en place d'un schéma analogue à ceux correspondant aux effondrements spontanés.

5.2.- Instabilité ancienne des carrières voisines

Nous mettons à part le glissement de terrain de surface du 20 décembre 1858 provoqué par l'exploitation des argiles sparnaciennes. Il est probable que les profils d'excavation successifs n'ont pas tenu compte de conditions de stabilité de versants, moins bien appréciées reconnaissons-le en 1858 que de nos jours. Il suffit dans ce contexte d'une faible surcharge pluviométrique ou d'une mauvaise évacuation pour déclencher des glissements¹⁵.

Plus intéressant est l'incident de 1868 (24-25 Juillet puis 10 Août de la même année) survenu dans les carrières des Montalets, relaté par M. Th. HERLEDAN (réf. A). Un fontis de 17 m de long et 50 m de profondeur s'est subitement formé qui a drainé toutes les eaux du quartier. Un barrage souterrain fait pour contenir ces eaux céda le 10 Août 1868 ce qui provoqua l'effondrement au-dessus des carrières MALSAC et PODEVIN. L'évacuation des eaux de surface posa des problèmes, une carrière en contre-bas fut inondée (BOURET). Les archives insistent sur le mauvais état des carrières : vides trop grands, trop grande hauteur et largeur excessive des galeries, faiblesse des piliers, dont certains minés par des trous à blanc. Nous ne disposons pas de données sur les formes des galeries.

¹⁵ Dans l'étude de Marie-Thérèse HERLEDAN (réf. A) où des détails sont donnés sur ce glissement, il est question de ruptures de "voûtes" qui n'ont, semble-t-il, rien à voir avec les voûtes des galeries.

Lors de l'effondrement de 1872 (nuit du 9 au 10 décembre) de la carrière des Brillants (coté Chemin de Saint Cloud) dans une zone proche de la Carrière ARNAUDET, on mentionne que suite à cet effondrement, l'eau de la Seine aurait envahi le niveau inférieur des galeries, mais il semble que ce soit la construction antérieure du barrage de Suresnes qui soit responsable de cette montée de niveau. Les piliers du bas ont été reconnus sains après la catastrophe bien qu'ils aient été inondés. Les rapports d'experts ont incriminé les "inégalités invisibles (on se demande un peu comment ils ont alors pu les voir) et imprévisibles dans l'épaisseur du ciel de la carrière, les pluies torrentielles et incessantes, de la fin Octobre à la fin Décembre 1872, qui "alourdirent le sol". Comme par hasard, on retrouve une liaison avec la pluviométrie. Il semble qu'une zone de 6858m² se soit créée, avec un effondrement de 9m en surface au centre du cône inversé représentant le fontis. Il est impossible de trancher entre effondrement localisé s'étant étendu et effondrement spontané.

Par ailleurs, on ne dispose que de peu d'informations sur les effondrements de 1843 et 1876 localisés sur la Commune de Clamart (ou Issy-les-Moulineaux)

L'effondrement de 1961 présente des caractéristiques particulières, notamment sa brutalité. Il a généré un souffle extrêmement puissant et dévastateur, ressenti à la sortie des galeries dans l'avenue de Verdun à Issy les Moulineaux et 21 victimes dans les effondrements de bâtiments de surface. Il semble que ces carrières aient été d'abord tracées avec beaucoup moins de soin que les carrières ARNAUDET, avec le souci d'extraire le maximum de matériau. Par ailleurs, il semblerait que des canalisations d'eau en surface aient été détériorées et qu'une mise en charge soit par la pluviométrie, soit par ces canalisations rompues, ne puisse être exclue. Ce caractère soudain, global de l'effondrement qui affecte une zone entière simultanément, la génération d'un effet de souffle se retrouve dans la plupart des effondrements spontanés réels pour lesquels la mise en charge hydraulique est pratiquement établie. Il nous paraît donc très probable que cet effondrement de 1961 a eu pour origine un tracé très défavorable des galeries, une mise en charge hydraulique du toit par surcharge d'origine pluviométrique et/ou accidentelle.

Il doit être noté que la Carrière ARNAUDET a été réalisée ultérieurement à l'effondrement de 1868 des Montalets, selon plans, recommandations et suivi très strict de l'Inspection des Carrières.

5.3.- Stabilité d'ensemble du versant

La stabilité d'ensemble du versant a été examinée dans le cadre de l'analyse de l'INERIS. Elle a été également examinée par divers experts et sociétés d'études dans le cadre de l'aménagement de la ZAC RODIN dans les années 80 et 90 (voir la liste de ces études et calculs dans la bibliographie du rapport INERIS).

La stabilité de ce versant est conditionnée par plusieurs éléments :

- la présence de diaclases de direction NE-SO avec des pendages faibles de 20 à 30° NO, qui affectent la partie Ouest des carrières où le recouvrement est le moins important. Ces cassures, incurvées vers l'Ouest¹⁶, montrent des déplacements de quelques centimètres vers l'Ouest, signe que des glissements se sont déjà produits sur ces surfaces ;

- le saut ou le relais de ces fractures sur des lits de silex, joints de stratification, ou autres familles de diaclases ;

- l'existence, à l'aplomb du Viaduc de la voie ferrée rive gauche, d'un "abrupt" voire d'un escarpement de craie, non visible actuellement car masquée par des éboulis et des remblayages divers. Cet escarpement a été révélé par des sondages et ferait 40 m de hauteur. Le "pied de talus" ou de versant est donc bloqué de façon très incertaine.

Comme l'observe l'INERIS, "ces fractures, bien qu'actuellement inactives, constituent par leurs caractéristiques et leur extension, un facteur primordial vis-à-vis de la stabilité des carrières et de tout le versant. Il doit être pris en compte pour éviter les possibilités de glissement sectoriel ou local et de chutes de toit localisées ou de parements de piliers".

Nous ajouterons que le régime hydraulique de ce versant est capital pour la stabilité d'ensemble du versant, même indépendamment des carrières. On peut même se demander si la stabilisation de ce versant n'est pas imputable à un drainage inévitable et bénéfique par les galeries. Toute modification imposée à ce réseau de drainage actuel par remblayage, injection, ou bouchage devrait être étroitement contrôlée de façon à ne pas compromettre la stabilité des fondations des ouvrages qu'il comporte, voie ferrée entre autres.

¹⁶ Ce sont les cassures appelées "diaclases laminaires" ou "fentes en cuillères" dans certains rapports.

5.4.- La surveillance pour son exploitation avec ouverture au public

En certains points particuliers des carrières, parfaitement recensés par l'INERIS, la stabilité locale doit être améliorée pour pouvoir être garantie à long terme, ce qui est très courant dans les exploitations souterraines surveillées en permanence par des mineurs spécialisés. Ceci est dû notamment à la présence de zones fracturées, aux effets de ruissellements, érosion et autres. Des recommandations ont été faites par l'INERIS pour des traitements locaux de ces zones et la mise en place de réseaux de surveillance avant une ouverture au public, car les exigences de sécurité sont accrues.

6 - CONCLUSIONS

Taillées dans la craie à comportement mécanique très particulier, les galeries de la Carrière ARNAUDET ont montré une stabilité exceptionnelle, confirmée dans le temps. Cette stabilité se situe presque en limite ou au-delà de prévisions théoriques par la mécanique des roches. Ce n'est pas la première surprise en termes de stabilité dans la craie : une expérience semblable de stabilité carrément "anormale" avait été faite dans des galeries de stockage du Vexin, par rapport à des méthodes classiques d'évaluation.

Il existe donc un contraste frappant entre ces galeries, remarquablement stables sur maintenant plus de 100 ans et celles du voisinage sièges d'une série impressionnante d'effondrements, de tristes bilan et mémoire. Le secteur ARNAUDET n'a montré et ne montre en effet pratiquement aucun signe ou manifestation d'instabilités selon les mécanismes courants en travaux souterrains.

A quelques centaines de mètres, les galeries des Montalets et les autres carrières de la Pièce des Brillants et Clamart, se situent dans des conditions géologiques très comparables. Elles ont par contre été le siège de nombreuses instabilités, localisées et progressives tout d'abord, dégénérant éventuellement en effondrements généralisés, affectant de vastes zones. L'effondrement de 1961 à Clamart rappelle fâcheusement le style dit "d'effondrement spontané", extrêmement dangereux, très vraisemblablement d'origine hydraulique.

Où se situe donc la clef de cette stabilité exceptionnelle ? le respect très exigeant de formes très bien adaptées, certainement acquises par l'expérience, les exigences et le contrôle de l'Inspection des Carrières en sont l'origine la plus probable. Les profils retenus pour

les voûtes assurent une très harmonieuse répartition des contraintes, leur esthétique correspondant aux schémas de lignes de force des efforts qu'elles ont à reprendre. Les soins réservés à l'exécution ont par ailleurs évité toutes les singularités et irrégularités de profil, souvent amorces de ruptures ultérieures.

Toujours par expériences successives, nos anciens ont réussi à "contourner" le comportement mécanique versatile et, disons-le, assez traître de la craie par des formes adéquates, modestes par rapport à ce qu'une exploitation plus intensive du matériau aurait nécessité, une ventilation permanente des chantiers.

L'ensemble des galeries ARNAUDET reste toutefois sensible : les carrières voisines étaient probablement plus vulnérables du fait de conception et réalisation moins soignées. Elles se sont effondrées sous l'effet de perturbations du réseau hydrogéologique, d'instabilités locales progressant, de reports de contraintes mal supportés par des profils de galeries inadaptés. On voit donc, d'une certaine façon, ce qu'il faut éviter aux galeries ARNAUDET.

Le versant, diaclasé, faillé et parcouru de diaclases (en fait de petites failles) déjà cisailées, constitue un réseau d'écoulement potentiel qui peut se réactiver. Il a déjà été le siège de déplacements de faible amplitude, mais sa stabilité pourrait être remise en question si des travaux venaient à obturer, modifier le réseau d'écoulement actuel et le drainage auquel les galeries contribuent. Une surveillance géotechnique de ce versant doit permettre de suivre son évolution.

Les galeries ARNAUDET constitue donc un ensemble architectural unique, incomparable esthétiquement, mais aussi par leur conception, leur arrangement et surtout leur remarquable réalisation. Dans l'état actuel et moyennant des travaux d'entretien recommandés et la surveillance de leur environnement, leur stabilité à long terme paraît assurée. Outre le soin à apporter à leur conservation dès maintenant pour en permettre l'accès public, il conviendra que nos héritiers prennent conscience de la valeur inestimable de ce patrimoine, unique au monde.

Vincent MAURY

Références

A - HERLEDAN M.-Th. "Carrières de craie de Meudon, les carrières des Montalets", Bulletin du Comité de Sauvegarde des Sites de Meudon N° 96 1998 N°2. et "Exploitation de la Pièce des Brillants au cours du XIXème Siècle".

B - JOSIEN J.-P., TRITSCH J.-J., "Etude de stabilité des carrières classées de Meudon, Rue du docteur ARNAUDET", I.N.E.R.I.S. Institut national de l'Environnement Industriel et des Risques, GAI-JJs-JTr 71-6258/R01, 10 Mars 1993.

C - MAURY V. Lettre du 5 décembre 1993 au Préfet des Hauts-de-Seine (à l'attention de M. Grand, Direction départementale de l'Equippement) et Note de Novembre 2001.

D - OBERT D. "Les Carrières de Meudon", Bulletin du Comité de Sauvegarde des Sites de Meudon N° 70 1989 N°3.

E - OBERT D. "Karst syntectonique dans la Craie de Meudon" Han 98 Tectonique, karst et séismes. Spéléochronos hors série 1998.

F - COLCHEN M. "Le site géologique de Meudon dans le Bassin de Paris", Bulletins du Comité de Sauvegarde des Sites de Meudon N°110 et 111 2003 N°1 et 2.

G - GOSSE E., LORENZ C., GALOYER A. et GELY J.P., LORENZ C., OBERT D. Articles regroupés dans "Les Carrières de Meudon", Extrait du Bulletin d'Information des Géologues du Bassin de Paris, Vol. 27, n° 4 - Décembre 1990. Ass. des Géologues du Bassin de Paris.

H - TINCELIN E. et SINOUP P. "Effondrements brutaux et généralisés, coups de toit" Rev. Ind. Min. pp 239-262 (1962).

I - MAURY V. "Effondrements spontanés : mécanisme initiateur par mise en charge hydraulique du toit" - Rev. Ind. Min. Oct.1979.

J - MAURY V. "An overview of tunnels and boreholes failure mechanisms", in Comprehensive Rock Engineering Vol. IV Ch. 14 J. Hudson Ed. Pergamon Pub. 1992.

K - MASSON M. "Pétrophysique de la craie" Bull. Liais. Lab. Ponts et Chauss., N° Spéc. V, Oct. 1973 pp 23-47.

L - MOIRIAT D. "Evolution des désordres dans les carrières souterraines abandonnées" Thèse soutenue le 30 Nov. 2001 Université Paris XI Orsay.

M - MAURY V. "An example of underground storage in soft rocks : the chalk" proceedings of Rockstore Intern. Symp. Stockholm (1977).

N - MAURY V., PIAU J.-M. and HALLÉ G. "Subsidence induced by water injection in water sensitive reservoir rocks : the example of Ekofisk". SPE 36890 presented at Europec 98 Milano.

O - GOSSÉ M.-E. "Seismic enhancement of joint hydraulic conductivity near caverns in rock masses" Th. Ms. Sc. Univ. d'Illinois (Etats-Unis) Evanston Juin 1988.

NOUVELLES BRÈVES

SUR LE DOMAINE ROYAL DE MEUDON : un ouvrage original, une étonnante histoire...

Avec ses précédents livres sur Meudon, Jean MENARD a déjà notablement contribué à faire connaître à un large public le riche passé historique de notre ville et les vestiges prestigieux ou modestes, qui, très nombreux, en sont les témoignages éloquents. Son dernier ouvrage se situe parfaitement dans la continuité de cette double mission.

"L'étonnante histoire des jeux d'eau et du réseau hydraulique du domaine royal de Meudon (1652 – 2001)" qui a vu le jour fin 2003 est un luxueux volume imprimé à compte d'auteur sur un très beau papier glacé, relié toile, que l'on ne se lasse pas de feuilleter pour découvrir et revoir plans, dessins d'archives dont beaucoup, coloriés, sont d'une esthétique raffinée, croquis et photographies de grande qualité.

Cependant les compliments que suscite cette fréquentation superficielle de l'ouvrage en raison de sa très belle présentation ne doivent pas occulter l'importance et l'intérêt du texte, fruit d'un travail considérable de l'auteur pour dépouiller les documents d'archives, rechercher et repérer sur le vaste terrain de l'ancien domaine royal les vestiges du réseau complexe conçu par les ingénieurs hydrauliciens de l'époque et nous montrer comment ceux-ci, en s'inspirant des réalisations faites à Versailles, sont parvenus à surmonter, non seulement les difficultés inhérentes à la topographie particulière des lieux, mais aussi celles qui tenaient aux exigences de résultats spectaculaires imaginés par le marquis de Louvois d'abord, puis par Louis XIV lui-même, après qu'il eut acheté le domaine en 1694 à la veuve de Louvois pour y installer le Grand Dauphin.

Sans jamais être fastidieux, Jean MENARD rend le lecteur admiratif de la minutie des levées topographiques nécessitées par le tracé d'un réseau hydraulique fait, tantôt de rigoles et de tranchées aériennes, tantôt de conduites souterraines assurant l'intercommunication de réservoirs. Ceux-ci étaient conçus pour pallier les aléas annuels et saisonniers des eaux pluviales qui, recueillies au niveau du plateau de Vélizy étaient amenées jusqu'aux bassins des jardins hauts et des jardins bas où de superbes jeux d'eau créaient un spectacle permanent que même

l'entretien indispensable de l'ensemble du dispositif ne devait, à aucun moment, perturber. Si la réalisation de ces "monuments liquides" comme on les désignait alors force l'admiration par leur qualité esthétique en harmonie avec un cadre de parterres et de bosquets, que dire du génie des hydrauliciens consistant à créer des jets atteignant une altitude maximale supérieure à celle des collecteurs d'eau ? Il s'agissait évidemment de vaincre la pesanteur par le refoulement de l'eau sous une pression suffisante, mais avec le concours de quelle énergie ? C'est le pourquoi et le comment de ces prouesses techniques qui nous sont dévoilés au fur et à mesure des pages des cinq premiers chapitres et comblent la curiosité du lecteur qu'étonne l'imagination créatrice d'ingénieurs dont plus de trois siècles nous séparent.

La citation de COLBERT placée en exergue au début de l'ouvrage : *"Songez que nous ne sommes pas dans un siècle de petites choses"* trouve une résonance particulière lorsque, par exemple, l'auteur décrit la mise en œuvre de deux moulins à vent à Villebon afin d'actionner des pompes refoulantes qui permettaient une remontée de l'eau vers un réservoir en plomb situé quelque douze mètres plus haut, sur un bâti de bois, à partir duquel l'eau s'écoulait par gravité vers le "réservoir neuf" – autre ouvrage gigantesque - destiné à approvisionner les différents bassins et leurs jets répartis dans les jardins hauts.

L'installation du Grand Dauphin à Meudon après que le domaine ait été cédé au roi ne pouvait conduire, au début du XVIII^{ème} siècle, qu'à l'apogée du domaine. Sous ce titre, le sixième chapitre du livre évoque les diverses transformations, améliorations techniques et embellissements, pour la plupart conçus par Louis XIV et, illustrations à l'appui, fait apparaître la splendeur de l'immense parc. Malheureusement, comme il fallait s'y attendre, l'apogée ne peut faire place qu'au déclin et celui-ci fait l'objet du chapitre suivant : à la mort de Louis XIV, les dépenses d'entretien du domaine sont devenues considérables. On trouve mention parfois de réparations effectuées sous la pression des doléances de ceux qui, à différents niveaux, ont eu en charge le maintien en bon état des installations mais, insidieusement, l'abandon du domaine progresse : déjà perceptible à la Régence, l'indifférence de Louis XV à l'égard du Château l'accentue ; Louis XVI, passionné par la chasse, s'intéressera surtout aux parties boisées et

délaissera le parc lorsque son fils aîné, envoyé à Meudon pour guérison, mourra au Château en 1789. La Révolution sonnera le glas des jeux d'eau ; la destruction partielle du Château vieux en 1795 par un incendie que la suppression des arrivées d'eau empêcha de juguler, eut pour effet l'organisation d'une récupération très systématique de toutes les pièces métalliques du parc, en vue d'usages militaires.

Avec le XIX^{ème} siècle s'ouvre le temps de l'oubli que développe le huitième chapitre. Il faut cependant parer au plus pressé, par exemple, lorsqu'un hôte est accueilli au Château neuf ou lorsque la Duchesse de GALLIERA demande l'alimentation en eau de sa propriété de Val Fleury avec son orphelinat. Mais ce ne sont que des soubresauts épisodiques dans la survie d'une réalisation gigantesque héritée d'un passé révolu. Les vestiges en seront peu à peu effacés, tantôt discrètement par le couvert végétal ou le comblement des rigoles par les fermiers désireux de gagner des surfaces labourables, tantôt drastiquement comme en 1929 par la construction de l'aérodrome de Villacoublay et, en définitive, par l'indifférence de l'Homme du début du XX^{ème} siècle, gravement ébranlé par deux guerres mondiales et soumis au modernisme triomphant.

Vestiges effacés ? Indifférence humaine ? Peut-être pas : dans son dernier chapitre, Jean MENARD qui, tantôt avec des spécialistes, tantôt seul a, durant plusieurs années, exploré le terrain domanial et fait des reconnaissances en des points peu ou pas connus du réseau hydraulique, passe en revue fossés et rigoles du réseau aérien encore aisément observables, aqueducs et conduites du réseau souterrain, points d'accès à celui-ci, ponceaux, témoins des réservoirs (le "vieil et le "neuf"), bassins disparus mais encore décelables grâce à quelques vestiges, bassins restaurés que chacun connaît et admire comme ceux du parterre de l'Orangerie, de la Grotte ou du Bel Air, en un mot un ensemble qui mériterait d'être protégé et offrirait un thème de visites guidées aux promeneurs du XXI^{ème} siècle, comme on le sait, autrement sensibles aux évocations du passé que leurs aînés du vingtième. Ce n'est pas l'un des moindres mérites de l'ouvrage de Jean MENARD, que de faire germer l'idée d'un tel projet. Pour cela et tout le travail que représente l'élaboration de ce livre original, on pardonnera aisément à l'auteur une "coquille orthographique" ici ou là dans le texte et même plusieurs

légendes insuffisamment détaillées dont on regrette, pour des illustrations de qualité, qu'elles ne jouent pas pleinement le rôle explicatif que peut souhaiter légitimement un lecteur non averti de la géographie du domaine royal, et que fait rêver "l'étonnante histoire" qui lui est contée.

L'ouvrage peut être acquis au prix de 44 euros en s'adressant à M. Jean MENARD, 5 rue de la Petite Fontaine à Meudon.

... et pour épilogue, une nouvelle association.

La reconnaissance sur le terrain des vestiges du réseau hydraulique du parc du Château, les réflexions mûries au cours de la rédaction de son ouvrage ont conduit Jean MENARD à l'idée qu'une association pour la réhabilitation de ce patrimoine et son exploitation sur le plan culturel pourrait constituer un interlocuteur privilégié pour les divers organismes publics susceptibles de promouvoir cet objectif.

Passant à l'acte, Jean MENARD a déposé les statuts d'une association pour "la réhabilitation du réseau hydraulique du domaine de Meudon" (ARHYME) et leur parution a eu lieu au journal officiel du 20 novembre 2003. L'extrait suivant permet de préciser ici les objectifs poursuivis :

"Faire connaître les grandioses réalisations des jeux d'eau et du réseau hydraulique réalisés par Louvois et le Grand Dauphin aux XVII^{ème} et XVIII^{ème} siècles.

Faire découvrir les vestiges subsistants sur le territoire de la commune de Meudon et alentours.

Proposer et soutenir toutes actions contribuant à leur réhabilitation et à leur sauvegarde."

Notre Comité, très favorable à cette initiative de mise en valeur d'un patrimoine meudonnais, afin de le faire mieux connaître en le situant dans son contexte historique, par exemple au cours de visites commentées, souhaite bien évidemment que la nouvelle association dont le siège est à l'adresse de Jean MENARD à Meudon, connaisse un franc succès, notamment avec la participation d'un grand nombre de ses adhérents.

Paulette GAYRAL



Michel DAMOUR

Tapissier

LITERIE, SIÈGES, VOILAGES
DOUBLE RIDEAUX

RÉFECTION MATELAS
& SOMMIERS

54, rue de Rushmoor - 92190 MEUDON

01 46 26 27 60 et 01 45 34 21 84

F**O****R****M'****S***Fournitures**Occasions**Reprographie**Maintenance**Secrétariat*

☎ 01 46 23 94 75

Fax 01 46 26 50 16

3, rue du Ponceau - 92190 MEUDON
(Continuité rue des Mouchettes - Près de la Mairie)

Ouvert du lundi au vendredi
10 h 30 - 12 h 30 / 15 h 00 à 18 h 00

- > PHOTOCOPIES ET FAX SERVICE
- > RELIURE - PLASTIFICATION
- > FOURNITURES DE BUREAU - TAMPONS ENCREURS
- > PAPETERIE
- > ENCRES - SUPPORTS SPÉCIAUX POUR IMPRIMANTES
- > TRAVAUX DE SECRÉTARIAT

Société d'Exploitation
des Établissements
L. WACQUANT

27, rue Marcel-Allégot, Bellevue
92190 MEUDON

☎ 01 45 34 12 01

COUVERTURE

PLOMBERIE EAU ET GAZ

Salles de Bains - Chauffe-bains,
Chauffe-eau à gaz et électriques
Chauffage gaz



GARAGE RABELAIS

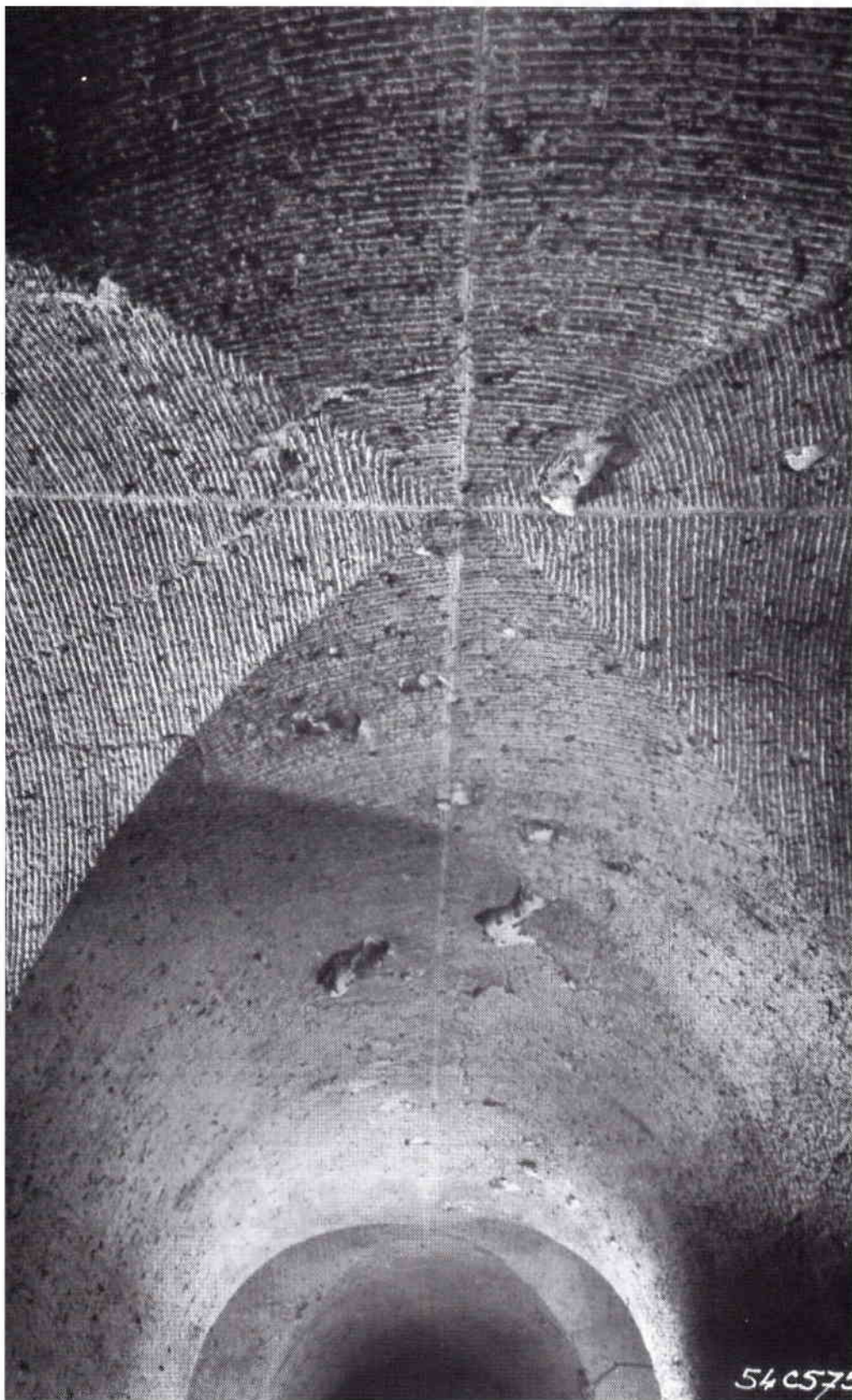
CITROËN MEUDON

29-31, boulevard des Nations-Unies
92190 MEUDON

☎ 01 46 26 45 50

MÉCANIQUE - TÔLERIE
STATION SERVICE - VENTE

Comité de Sauvegarde des Sites de Meudon. Siège social : 6, avenue Le Corbeiller, 92190 Meudon



Vue sur les croisées de voûte du plafonds de la Carrière ARNAUDET
Les petites taches correspondent à des silex. (*Cliché : Vincent MAURY*)

Prix : 3 euros